



Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía

Escuela Técnica Superior de Ingenieros en  
Topografía, Geodesia y Cartografía



# Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial

Tesis Doctoral

Autor:

José Juan Arranz Justel

Ingeniero en Geodesia y Cartografía

Directores:

Santiago Ormeño Villajos

Doctor Ingeniero Agrónomo

Juan Manuel Vicent García

Doctor en Historia

2013



Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magnífico de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 26 de Abril de 2013.

**Presidente:**

D. Alfredo Llanos Viña

**Vocales:**

D. Francisco Javier González Matesanz

D. César Parcero Oubiña

D. Julio Mezcu Rodríguez

**Secretario:**

D. Francisco García Cepeda

**Suplentes:**

D. Carlos Fernández Freire

Dña. Gracia Rodríguez Caderot

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día .... de ..... de 2013  
en la E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía.

Calificación .....

El presidente

Los vocales

El secretario





Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico,  
registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial

Dedicada a Emma, Jaime, Samuel y Marco.



# Resumen

El objetivo de la presente tesis doctoral es el desarrollo e implementación de un sistema para mejorar la metodología de extracción de la información geométrica necesaria asociada a los procesos de documentación de entidades de interés patrimonial, a partir de la información proporcionada por el empleo de sensores láser, tanto aéreos como terrestres.

Para ello, inicialmente se realiza una presentación y justificación de los antecedentes y la problemática en el registro de información geométrica para el patrimonio, detallando todos aquellos sistemas de registro y análisis de la información geométrica utilizados en la actualidad. Este análisis permitirá realizar la comparación con los sistemas de registro basados en técnicas láser, aportando sugerencias de utilización para cada caso concreto.

Posteriormente, se detallan los sistemas de registro basados en técnicas láser, comenzando por los sensores aerotransportados y concluyendo con el análisis pormenorizado de los sensores terrestres, tanto en su aplicación en modo estático como móvil. Se exponen las características técnicas y funcionamiento de cada uno de ellos, así como los ámbitos de aplicación y productos generados. Se analizan las fuentes de error que determinan la precisión que puede alcanzar el sistema.

Tras la exposición de las características de los sistemas LiDAR, se detallan los procesos a realizar con los datos extraídos para poder generar la información necesaria para los diferentes tipos de objetos analizados. En esta exposición, se hace hincapié en los posibles riesgos que pueden ocurrir en algunas fases delicadas y se analizarán los diferentes algoritmos de filtrado y clasificación de los puntos, fundamentales en el procesamiento de la información LiDAR.

Seguidamente, se propone una alternativa para optimizar los modelos de procesamiento existentes, basándose en el desarrollo de algoritmos nuevos y herramientas informáticas que mejoran el rendimiento en la gestión de la información LiDAR. En la implementación, se han tenido en cuenta características y necesidades particulares de la documentación de entidades de interés patrimonial, así como los diferentes ámbitos de utilización del LiDAR, tanto aéreo como terrestre. El resultado es un organigrama de las tareas a realizar desde la nube de puntos LiDAR hasta el cálculo de los modelos digitales del terreno y de superficies.

Para llevar a cabo esta propuesta, se han desarrollado hasta 19 algoritmos diferentes que comprenden implementaciones para el modelado en 2.5D y 3D, visualización, edición, filtrado y clasificación de datos LiDAR, incorporación de información de sensores pasivos y cálculo de mapas derivados, tanto raster como vectoriales, como pueden ser mapas de curvas de nivel y ortofotos.

Finalmente, para dar validez y consistencia a los desarrollos propuestos, se han realizado ensayos en diferentes escenarios posibles en un proceso de documentación del patrimonio y que abarcan desde proyectos con sensores aerotransportados, proyectos con sensores terrestres estáticos a media y corta distancia, así como un proyecto con un sensor terrestre móvil. Estos ensayos han permitido definir los diferentes parámetros necesarios para el adecuado funcionamiento de los algoritmos propuestos.

Asimismo, se han realizado pruebas objetivas expuestas por la ISPRS para la evaluación y comparación del funcionamiento de algoritmos de clasificación LiDAR. Estas pruebas han permitido extraer datos de rendimiento y efectividad del algoritmo de clasificación presentado, permitiendo su comparación con otros algoritmos de prestigio existentes. Los resultados obtenidos han constatado el funcionamiento satisfactorio de la herramienta.

Esta tesis está enmarcada dentro del proyecto Consolider-Ingenio 2010: “Programa de investigación en tecnologías para la valoración y conservación del patrimonio cultural” (ref. CSD2007-00058) realizado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Universidad Politécnica de Madrid.

# Abstract

The goal of this thesis is the design, development and implementation of a system to improve the extraction of useful geometric information in Heritage documentation processes. This system is based on information provided by laser sensors, both aerial and terrestrial.

Firstly, a presentation of recording geometric information for Heritage processes is done. Then, a justification of the background and problems is done too. Here, current systems for recording and analyzing the geometric information are studied. This analysis will perform the comparison with the laser system techniques, providing suggestions of use for each specific case.

Next, recording systems based on laser techniques are detailed. This study starts with airborne sensors and ends with terrestrial ones, both in static and mobile application. The technical characteristics and operation of each of them are described, as well as the areas of application and generated products. Error sources are also analyzed in order to know the precision this technology can achieve.

Following the presentation of the LiDAR system characteristics, the processes to generate the required information for different types of scanned objects are described; the emphasis is on the potential risks that some steps can produce. Moreover different filtering and classification algorithms are analyzed, because of their main role in LiDAR processing.

Then, an alternative to optimize existing processing models is proposed. It is based on the development of new algorithms and tools that improve the performance in LiDAR data management. In this implementation, characteristics and needs of the documentation of Heritage entities have been taken into account. Besides, different areas of use of LiDAR are considered, both air and terrestrial. The result is a flowchart of tasks from the LiDAR point cloud to the calculation of digital terrain models and digital surface models.

Up to 19 different algorithms have been developed to implement this proposal. These algorithms include implementations for 2.5D and 3D modeling, viewing, editing, filtering and classification of LiDAR data, incorporating information from passive sensors and calculation of derived maps, both raster and vector, such as contour maps and orthophotos.

Finally, in order to validate and give consistency to the proposed developments, tests in different cases have been executed. These tests have been selected to cover different possible scenarios in the Heritage documentation process. They include from projects with airborne sensors, static terrestrial sensors (medium and short distances) to mobile terrestrial

sensor projects. These tests have helped to define the different parameters necessary for the appropriate functioning of the proposed algorithms.

Furthermore, proposed tests from ISPRS have been tested. These tests have allowed evaluating the LiDAR classification algorithm performance and comparing it to others. Therefore, they have made feasible to obtain performance data and effectiveness of the developed classification algorithm. The results have confirmed the reliability of the tool.

This investigation is framed within Consolider-Ingenio 2010 project titled “Programa de investigación en tecnologías para la valoración y conservación del patrimonio cultural” (ref. CSD2007-00058) by Consejo Superior de Investigaciones Científicas and Universidad Politécnica de Madrid.

# Contenido

<b>Bloque I INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES</b>	<b>19</b>
<b>Capítulo 1 Introducción</b>	<b>21</b>
1.1. Antecedentes	21
1.1.1. Contexto de la investigación	21
1.1.2. Metodologías clásicas de registro existentes en Arqueología	24
1.1.3. Metodologías de registro geomáticas	26
1.2. Objetivos de la tesis	31
1.2.1. Objetivos generales	32
1.2.2. Objetivos específicos	33
1.3. Estructura de la tesis	35
<b>Capítulo 2 Sistemas genéricos de registro y análisis de información geométrica</b>	<b>37</b>
2.1. Introducción	37
2.2. Técnicas topográficas clásicas	41
2.2.1. Introducción	41
2.2.2. Instrumentación	41
2.2.3. Métodos topográficos	45
2.3. Técnicas de Posicionamiento Global por Satélite	49
2.3.1. Introducción	49
2.3.2. Sistemas de posicionamiento actuales	52
2.3.3. Instrumentación	55
2.3.4. Medidas de distancia a satélites y método diferencial	59
2.3.5. Tipos de posicionamiento	61
2.4. Técnicas fotogramétricas	66
2.4.1. Fotogrametría aérea	68
2.4.2. Fotogrametría de objeto cercano	79
2.4.3. Fotogrametría con vehículos no tripulados	86
2.4.4. Productos generados	92
2.4.5. Aplicaciones	92
2.5. Teledetección	93
2.5.1. Introducción	93

2.5.2. Sensores pasivos	94
2.5.3. Sensores activos	101
<b>Bloque II MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>113</b>
<b>Capítulo 3 Sistemas de registro basados en técnicas láser</b>	<b>115</b>
3.1. Introducción	115
3.2. Antecedentes	118
3.3. LiDAR aerotransportado	120
3.3.1. Introducción	120
3.3.2. Características técnicas	121
3.3.3. Productos generados	130
3.3.4. Aplicaciones	143
3.3.5. LiDAR batimétrico	146
3.3.6. Precisión geométrica	148
3.4. LiDAR terrestre estático	152
3.4.1. Introducción	152
3.4.2. Características técnicas	153
3.4.3. Productos generados	157
3.4.4. Aplicaciones	158
3.5. LiDAR terrestre móvil	160
3.5.1. Introducción	160
3.5.2. Características técnicas	160
3.5.3. Productos generados	164
3.5.4. Aplicaciones	164
3.5.5. Sistemas móviles en interiores	165
3.6. Análisis comparativo con otros sistemas de registro	166
3.6.1. Introducción	166
3.6.2. Técnicas topográficas clásicas	166
3.6.3. Técnicas GNSS	167
3.6.4. Técnicas fotogramétricas	167
3.6.5. Teledetección	173
3.6.6. Resumen	174
3.7. Tendencia futura	175
<b>Capítulo 4 Modelo de datos y procesado de la información con sistemas láser</b>	<b>177</b>
4.1. Estructuras y formato de la información	177
4.2. Láser aerotransportado	179



4.2.1. Datos de los sensores	180
4.2.2. Nube de puntos láser	187
4.2.3. Filtrado	189
4.2.4. Clasificación	191
4.2.5. Control de calidad	201
4.2.6. Modelo Digital del Terreno y de Superficies	203
4.3. Láser terrestre	205
4.3.1. Introducción	205
4.3.2. Captura de datos	205
4.3.3. Registro de la información	206
4.3.4. Modelado	207
4.3.5. Aplicaciones	210
<b>Capítulo 5 Optimización y propuesta de modelos</b>	<b>211</b>
5.1. Introducción	211
5.1.1. Objetivos y planteamiento	211
5.1.2. Procesos previos	212
5.2. Triangulación rápida en 2D	213
5.2.1. Introducción	213
5.2.2. Algoritmos de triangulación	214
5.2.3. Algoritmos para el tratamiento de grandes conjuntos de datos	217
5.2.4. Algoritmo desarrollado	218
5.3. Tetraedrización	225
5.3.1. Introducción	225
5.3.2. Algoritmo de modelado tridimensional	226
5.3.3. Algoritmo para la extracción de la superficie envolvente	227
5.3.4. Edición del modelo	229
5.3.5. Resultados obtenidos	229
5.4. Clasificación de puntos medidos mediante técnicas láser de barrido	231
5.4.1. Introducción	231
5.4.2. En función de la geometría	232
5.4.3. En función del orden de registro	237
5.4.4. En función de la radiometría	240
5.4.5. En función de la geometría y radiometría	243
5.4.6. Detección de puntos erróneos	244
5.4.7. Detección automática de puntos pertenecientes a edificaciones	246
5.4.8. Detección en función de la morfología	249
5.4.9. Superficie mágica	251

5.5. Extracción automática de líneas límite	255
5.6. Integración de información multispectral	257
5.6.1. Introducción	257
5.6.2. Imagen cónica, sin parámetros de orientación interna ni externa	257
5.6.3. Imagen cónica, con parámetros de orientación interna y externa	260
5.6.4. Imagen en proyección ortogonal	261
5.6.5. Gestión del color	262
5.7. Obtención de datos derivados	265
5.7.1. Introducción	265
5.7.2. Mapas de curvas de nivel	265
5.7.3. Ortofotografía	266
<b>Capítulo 6 Definición de la estructura de los modelos</b>	<b>271</b>
6.1. Diagrama de flujo	271
6.1.1. Introducción	271
6.1.2. Triangulación rápida en 2D	272
6.1.3. Tetraedrización	273
6.1.4. Clasificación de puntos láser	274
6.1.5. Proceso completo	287
6.2. Manual de referencia	289
6.2.1. Introducción	289
6.2.2. Triangulación 2D	289
6.2.3. Tetraedrización	289
6.2.4. Clasificación de puntos láser	290
6.2.5. Extracción automática de líneas límite	295
6.2.6. Obtención de datos derivados	296
<b>Capítulo 7 Validación del sistema</b>	<b>299</b>
7.1. Ensayos realizados	299
7.1.1. Zona rústica	299
7.1.2. Zona urbana	303
7.1.3. Zona de gran densidad de vegetación	308
7.1.4. Fachada arquitectónica	311
7.1.5. Grabados rupestres	315
7.1.6. Láser terrestre móvil	320
7.1.7. Túnel	322
7.2. Evaluación con datos de referencia	324
7.2.1. Introducción	324
7.2.2. Pruebas realizadas	325
7.2.3. Comparativas con otros algoritmos	334

7.2.4. Conclusiones	337
<b>Capítulo 8 Discusión de resultados</b>	<b>339</b>
8.1. Algoritmos propuestos	339
8.1.1. Modelado	339
8.1.2. Clasificación	340
8.1.3. Extracción de datos	342
8.2. Validación del sistema	343
8.2.1. Ensayos realizados	343
8.2.2. Evaluación con datos de referencia	345
<b>Bloque III CONCLUSIONES</b>	<b>349</b>
Capítulo 9 Conclusiones	351
Capítulo 10 Futuras líneas de investigación	355
<b>Bloque IV BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>357</b>
Capítulo 11 Bibliografía	359
<b>Bloque V ANEXOS</b>	<b>373</b>
Anexo A Fundamentos de la medición láser	375
A.1. Introducción	375
A.2. Triangulación	377
A.3. Interferometría	380
A.4. Medición de tiempo	381
A.4.1. Características generales	381
A.4.2. Escáneres basados en pulsos (Tiempo de vuelo)	390
A.4.3. Escáneres basados en diferencia de fase	392
A.4.4. Diferentes montajes de los sensores de barrido láser	394
A.5. Cámaras láser 3D	398
A.6. Análisis <i>full-waveform</i>	400
A.7. Múltiples pulsos simultáneos	402
A.8. Clases de láser	404

<b>Anexo B Especificaciones técnicas de dispositivos</b>	<b>407</b>
B.1. Sensores topográficos aerotransportados	407
B.1.1. Leica ALS70	408
B.1.2. Optech ALTM Pegasus HD500	409
B.1.3. Riegl LMS-Q780	410
B.1.4. Riegl VQ-580	410
B.1.5. IGI LiteMapper 6800	411
B.1.6. Trimble Harrier	412
B.1.7. Fugro FLI-MAP	412
B.1.8. Otros sensores	413
B.2. Sensores batimétricos	414
B.2.1. Optech CZMIL	414
B.2.2. Optech ALTM Aquarius	415
B.2.3. Riegl VQ-820-G	415
B.2.4. AHAB HawkEye II	415
B.3. Sensores terrestres	416
B.3.1. Medición por Pulso	417
B.3.2. Medición por Desviación de Fase	420
B.3.3. Medición por Triangulación	422
B.4. Sistemas móviles	424
B.4.1. 3D Laser Mapping - IGI	424
B.4.2. Topcon IP-S2	424
B.4.3. Mitsubishi MMS	425
B.4.4. Trimble MX	426
B.4.5. Optech LYNX	427
B.4.6. Leica Pegasus SM 70	428
B.4.7. Riegl VMX	429
B.4.8. Siteco Road-Scanner	429
B.4.9. MDL Dynascan	429
B.5. Sistemas inerciales	430
B.5.1. IGI AEROcontrol	430
B.5.2. Applanix POS AV	431
B.5.3. Leica IPAS 20	431
B.5.4. Honeywell	431
B.5.5. IXBLUE AIRINS	432
<b>Anexo C Especificaciones técnicas de aplicaciones informáticas</b>	<b>433</b>
C.1. Introducción	433
C.2. LiDAR aéreo	436
C.2.1. MARS	436

C.2.2. Terrasolid Suite	436
C.2.3. Fledermaus	437
C.2.4. Quick Terrain Modeler	438
C.2.5. MDTopX	439
C.2.6. SCOP++	440
C.3. LiDAR Terrestre	441
C.3.1. RealWorks	441
C.3.2. 3DReshaper	441
C.3.3. Cyclone	442
C.3.4. PolyWorks	443
<b>Anexo D Sistemas de referencia</b>	<b>445</b>
D.1. Sistemas de coordenadas tridimensionales	445
D.1.1. Sistemas de coordenadas terrestres globales	445
D.1.2. Sistemas de coordenadas locales	448
D.2. Superficies de referencia altimétricas	449
D.2.1. Superficie de nivel	449
D.2.2. Cota, desnivel y altitud	449
D.2.3. Corrección ortométrica	450
D.3. Operaciones entre sistemas de referencia	453
D.3.1. Transformación de semejanza (Helmert)	453
D.3.2. Otros métodos de transformación	455
D.4. Proyecciones cartográficas	456
<b>Anexo E Manual de usuario</b>	<b>459</b>
E.1. Buscar puntos elevados	459
E.2. Buscar puntos aislados	460
E.3. Buscar puntos aéreos	461
E.4. Buscar puntos hundidos	462
E.5. Buscar puntos por diferencia de intensidad	463
E.6. Buscar puntos según línea de vuelo	464
E.7. Buscar puntos según geometría más RGB	465
E.8. Buscar puntos según geometría más intensidad	466
E.9. Buscar puntos en Superficies Planas	468
E.10. Buscar puntos en Paredes	469
E.11. Superficie mágica	470
E.12. Orientación Midiendo Puntos	471

<b>Anexo F Referencias</b>	<b>473</b>
F.1. Glosario de términos y acrónimos	473
F.2. Relación de figuras	482
F.3. Relación de tablas	498

Bloque I

# INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES





# Introducción

## 1.1. Antecedentes

### 1.1.1. Contexto de la investigación

Según la UNESCO, el patrimonio de una nación lo conforman el territorio que ocupa, su flora y fauna, y todas las creaciones y expresiones de las personas que lo han habitado: sus instituciones sociales, legales y religiosas; su lenguaje y su cultura material desde las épocas históricas más antiguas (UNESCO, 1972). El patrimonio comprende los bienes materiales e inmateriales heredados de los antepasados; el ambiente donde se vive; los campos, ciudades y pueblos; las tradiciones y creencias que se comparten; los valores y religiosidad; la forma de ver el mundo y adaptarse a él. El patrimonio natural y cultural constituyen la fuente insustituible de inspiración y de identidad de una nación, pues es la herencia de lo que ella fue, el sustrato de lo que es y el fundamento del mañana que aspira a legar a sus hijos. Se puede realizar una primera distinción entre el patrimonio natural y cultural.

El patrimonio natural está constituido por la variedad de paisajes que conforman la flora y fauna de un territorio. La UNESCO lo define como aquellos monumentos naturales, formaciones geológicas, lugares y paisajes naturales, que tienen un valor relevante desde el punto de vista estético, científico y/o medioambiental. El patrimonio natural lo constituyen las reservas de la biosfera, los monumentos naturales, las reservas y parques nacionales, y los santuarios de la naturaleza.

El patrimonio cultural está formado por aquellos bienes que la historia le ha legado a una nación y por aquellos que en el presente se crean y a los que la sociedad les otorga una especial importancia histórica, científica, simbólica o estética. Es la herencia recibida de los antepasados, y que viene a ser el testimonio de su existencia, de su visión de mundo, de sus formas de vida y de su manera de ser, y es también el legado que se deja a las generaciones futuras. Este patrimonio cultural se divide, a su vez, en dos tipos: material e inmaterial.

El patrimonio material es la expresión de las culturas a través de grandes realizaciones materiales. A su vez, el patrimonio material se puede clasificar en mueble e inmueble.

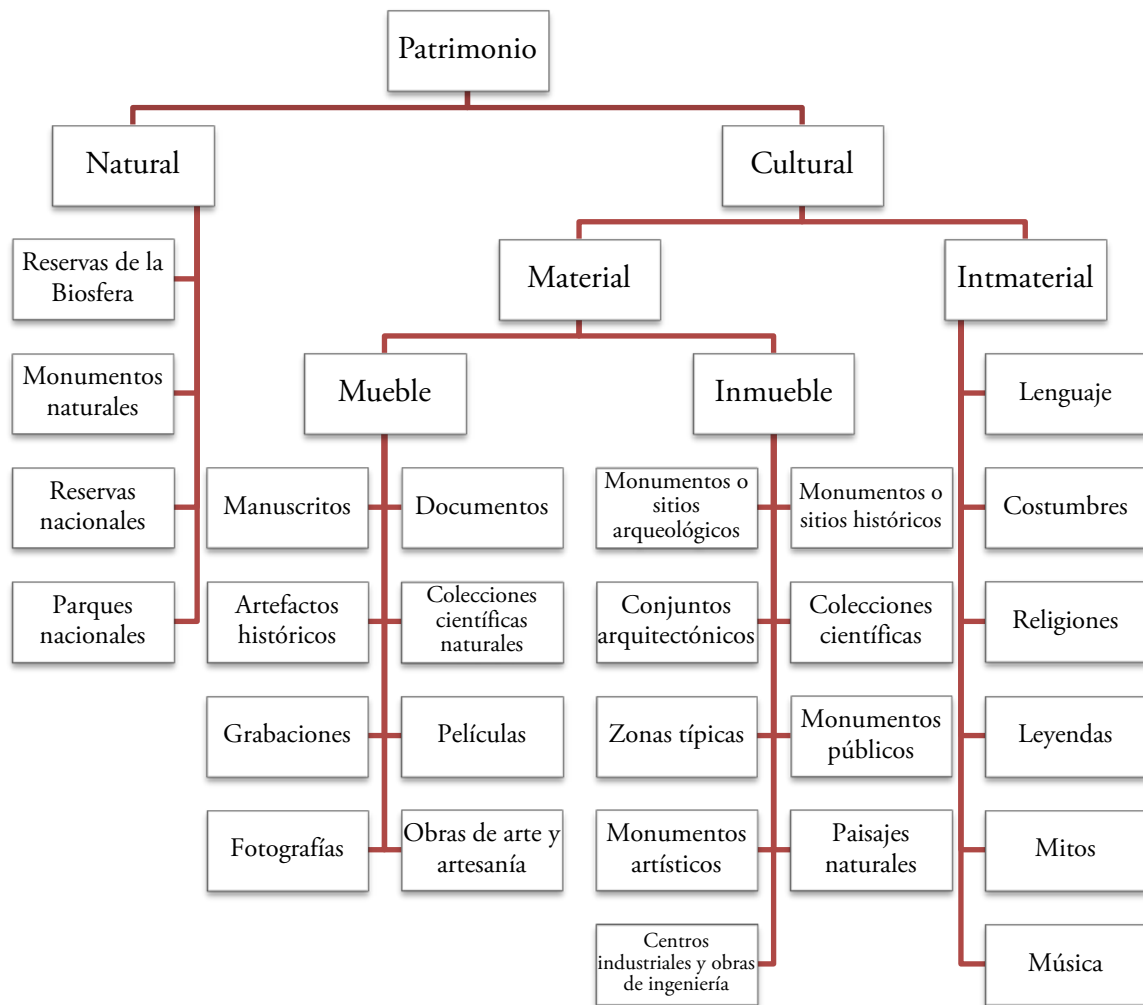


Figura 1: Cuadro resumen de tipos de patrimonio (UNESCO, 1972).

El patrimonio material mueble comprende los objetos arqueológicos, históricos, artísticos, etnográficos, tecnológicos, religiosos y aquellos de origen artesanal o folklórico que constituyen colecciones importantes para las ciencias, la historia del arte y la conservación de la diversidad cultural del país. Entre ellos cabe mencionar las obras de arte, libros manuscritos, documentos, artefactos históricos, grabaciones, fotografías, películas, documentos audiovisuales, artesanías y otros objetos de carácter arqueológico, histórico, científico y artístico.

El patrimonio material inmueble está constituido por los lugares, sitios, edificaciones, obras de ingeniería, centros industriales, conjuntos arquitectónicos, zonas típicas y monumentos de interés o valor relevante desde el punto de vista arquitectónico, arqueológico, histórico, artístico o científico, reconocidos y registrados como tales. Estos bienes culturales inmuebles son obras o producciones humanas que no pueden ser trasladadas de un lugar a otro, ya sea porque son estructuras (por ejemplo, un edificio), o porque están en inseparable relación con el terreno (por ejemplo, un sitio arqueológico).

El patrimonio inmaterial está constituido por aquella parte invisible que reside en el espíritu mismo de las culturas. Está constituido, entre otros elementos, por la poesía, los

ritos, los modos de vida, la medicina tradicional, la religiosidad popular y las tecnologías tradicionales.

La importancia de la documentación del patrimonio es más necesaria que nunca debido a los desastres naturales y humanos, la extrema explotación de los recursos naturales y los acontecimientos históricos de cada país. A escala mundial, se utiliza la figura de patrimonio de la humanidad (*World Heritage*), para proteger aquellos bienes de interés internacional.

La documentación del patrimonio cultural abarca una amplia gama de actividades, desde la adquisición de datos, metodologías de registro y visualización hasta la gestión e intercambio de información. Por ello, se requiere un enfoque interdisciplinario con el aporte de diferentes científicos y metodologías. Para la documentación se requiere un conocimiento profundo sobre patrimonio cultural, por lo que el modelado geométrico preciso es una parte insustituible no sólo para la restauración, sino también para su conservación. De hecho, diversas organizaciones internacionales como UNESCO, ICOMOS (*International Council On MONuments and Sites*) o CIPA (*Comité International de Photogrammétrie Architecturale*) están trabajando junto con la ISPRS (Asociación Internacional de Fotogrametría y Teledetección) para mejorar las técnicas de documentación geométrica, como lo demuestran los múltiples foros en los que se debaten y analizan (Moysiadis & Perakis, 2011).

En patrimonio cultural, los monumentos incluyen obras arquitectónicas, esculturas o pinturas, así como elementos o estructuras de carácter arqueológico como grabados o cuevas. Los grupos de casas incluyen edificios agrupados o aislados de interés arquitectónico mientras que los asentamientos son zonas naturales aprovechadas y/o modificadas por el hombre para asentarse. Su documentación necesita el registro de su posición, forma y dimensiones, como cualquier otro proyecto, utilizando la mejor metodología y el equipo adecuado. Hay una amplia gama de técnicas de medición 3D que se caracterizan por el tipo de medición, la escala del producto final, el tamaño, la complejidad del objeto y el presupuesto disponible. Para este cometido y según el proyecto, se puede recurrir a metodologías de topografía convencional, fotogrametría aérea o de objeto cercano, teledetección y técnicas de escaneo láser aéreo o terrestre.

La Arqueología ocupa un importante lugar dentro del conjunto del patrimonio cultural. Es la disciplina que estudia las sociedades a través de sus restos materiales, sean estos intencionales o no, con el fin de inferir los comportamientos y situaciones que le dieron origen. En algunos países la Arqueología ha estado considerada siempre como una disciplina perteneciente a la Antropología; mientras que ésta se centra en el estudio de las culturas humanas, la Arqueología se dedicaba al estudio de las manifestaciones materiales de éstas. Gracias a este matiz material del análisis de la Historia, es una fuente significativa de estudios que precisan ser documentados por medio de su registro geométrico.

Según el concepto de patrimonio y las áreas que abarca se puede deducir un amplio abanico de tipologías de entidades. Desde un punto de vista geométrico, aquellas entidades que son factibles de registrar, están distribuidas desde un tamaño de miles de km<sup>2</sup> como

### 1.1.2. Metodologías clásicas de registro existentes en Arqueología

El registro mediante estas técnicas clásicas requiere un contacto sobre el objeto lo cual pone en riesgo su integridad. Su aplicación se limita a medidas de control y medidas suplementarias, sirviendo de soporte para la construcción de planos por medio de ordenador a partir de gráficos básicos. Además, sólo se pueden cubrir áreas reducidas. Sin embargo, son sencillos, rápidos y económicos, permitiendo detallar al mismo tiempo que se está realizando una interpretación del objeto.

En el caso de asentamientos, se realizaban mediciones tomando como referencia objetos identificables en el terreno para ubicar el sitio. Debido a su extensión, estas representaciones carecían de cualquier rigor métrico, existía desconexión entre los elementos medidos, sin sistema de coordenadas y de pobre calidad (figura 2).

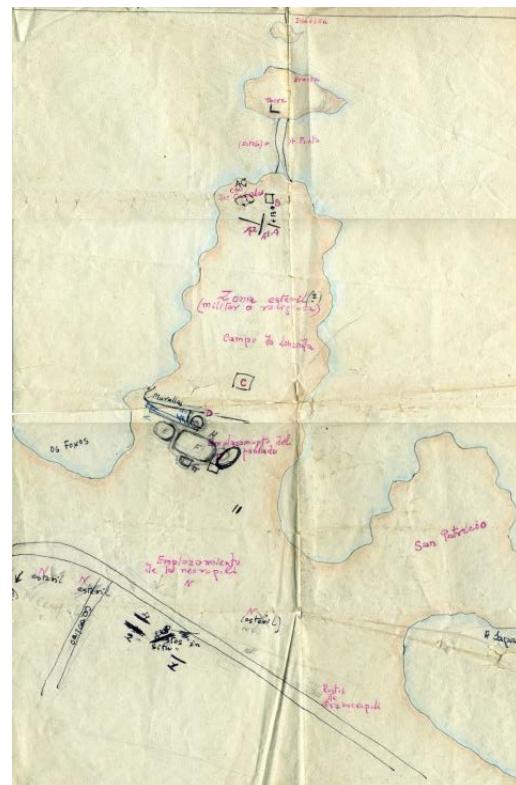
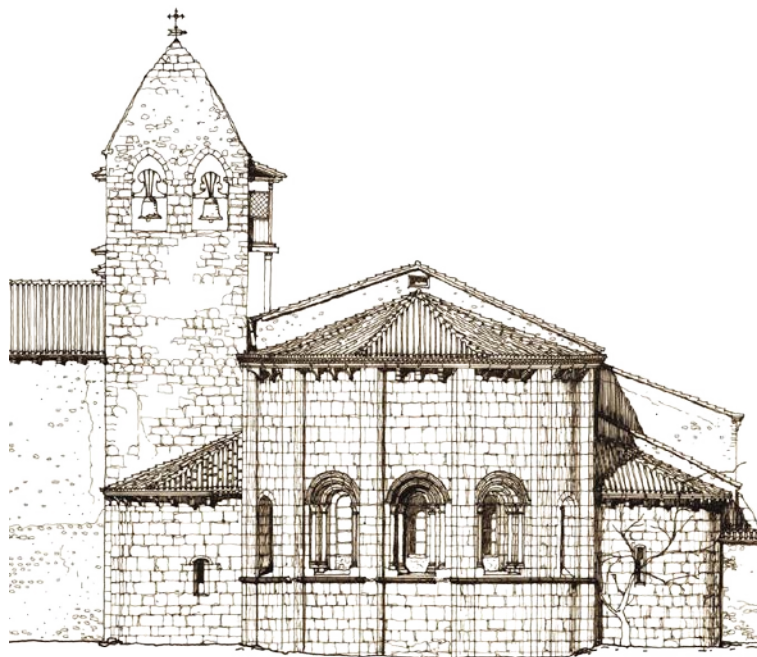


Figura 2: Croquis del yacimiento arqueológico de A Lanzada (Pontevedra) realizada por el CSIC (2010).

uso de registro de monumentos o edificios de interés, se realizaban laboriosos y a “mano alzada” destacando todos los detalles que “in situ” se apreciaban del caso, expertos dibujantes generaban valiosos documentos que, sin un esmero riguroso, expresaban con calidad y detalle los ornamentos de la obra. Sirva como ejemplo, el dibujo realizado por José Sandoval del Instituto del Patrimonio Cultural (Figura 4).



José Juan Arranz Justel

### 1.1.3. Metodologías de registro geomáticas

Sin embargo, hoy en día se puede recurrir a avanzadas técnicas geomáticas para el registro de patrimonio. Se entiende por Geomática al conjunto de ciencias en las cuales se integran los medios para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica (también denominada espacial o geoespacial). En este conjunto se incluyen la Topografía, la Geodesia, la Cartografía, la Fotogrametría y la Teledetección (Bryan, et al., 2009).

El proceso de documentación geométrica se podrá dividir en el levantamiento y el modelado. El levantamiento consiste en el conjunto de medidas realizadas sobre una zona u objeto en el espacio tridimensional, que permitirá la determinación de sus características geométricas mediante el posicionamiento de puntos y/o líneas. El levantamiento se realiza utilizando alguna de las técnicas de registro que a continuación se exponen. Por otro lado, el modelado tridimensional es el conjunto de procesos matemáticos que permiten la representación de un objeto a partir de la información recogida en la fase de levantamiento. Para ello, se emplearán algoritmos y herramientas informáticas que permitirán su tratamiento, análisis, visualización y extracción de resultados. Estas herramientas harán uso de primitivas matemáticas de superficie más complejas que las utilizadas para el registro: mallas, triángulos, splines, NURBS, etc. El proceso de modelado se encontraría en el ámbito de la Cartografía.

Las diferentes técnicas de registro tridimensional utilizadas en el proceso de levantamiento se podrían dividir en aquellas basadas en la captura de imagen (sensores pasivos) liderados por la Fotogrametría que permite generar nubes de puntos más o menos densas o mapas vectoriales; las basadas en la medida de distancias (sensores activos) representados por sensores de barrido láser o radar, que generan densas nubes de puntos; y las basadas en levantamientos topográficos, en las que se utilizan estaciones totales o receptores GNSS generando nubes de puntos dispersas así como algunos elementos lineales, con bajos rendimientos.

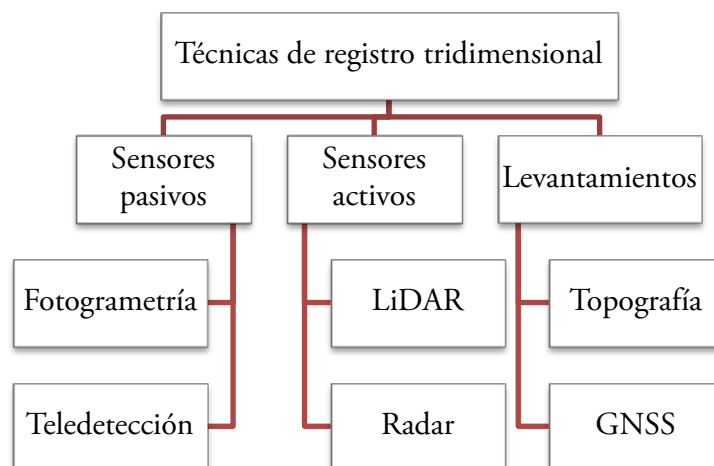


Figura 5: Técnicas de registro tridimensional.



### 1.1.3.1. Topografía

La Topografía proporciona las metodologías de medición no invasivas necesarias para el registro de patrimonio cultural contribuyendo, en gran medida, a la reducción de riesgo de daños en el objeto. Existe una amplia variedad de instrumental y métodos topográficos que proporcionan la información planimétrica y altimétrica necesaria para documentar un proyecto de arqueología. Su precisión es alta pero, a pesar de los avances tecnológicos en las estaciones totales, el rendimiento de estas técnicas no es elevado.



Figura 6: Levantamiento topográfico de un edificio romano en Wiltshire (Reino Unido).

### 1.1.3.2. Geodesia

La aparición de los sistemas de posicionamiento global (GNSS) para uso civil revolucionó el mundo de la Topografía en la década de 1990. Estos instrumentos permiten conocer la posición absoluta de un punto mediante comunicación con constelaciones de satélites. La ausencia de mediciones para la transferencia de coordenadas entre puntos, convierte a este método en rápido y preciso, puesto que la precisión se mantiene prácticamente constante para un mismo levantamiento. Existen muchos modelos de receptores que permiten desde situar un yacimiento o asentamiento con varios metros de precisión hasta situar la posición de objetos de detalle con precisión milimétrica.



Figura 7: Levantamiento utilizando técnicas GNSS en Stonehenge (Reino Unido).

### 1.1.3.3. Fotogrametría

Las primeras mediciones utilizando Fotogrametría datan de mediados del siglo XIX. El término fue introducido por el arquitecto Meydenbauer, quien tuvo la idea de utilizar imágenes fotográficas para la documentación geométrica de fachadas. Desde entonces, la Fotogrametría ha proporcionado la integridad, precisión, exactitud uniforme, textura y datos tridimensionales necesarios para la documentación del patrimonio cultural. Hoy en día, se siguen desarrollando nuevas técnicas fotogramétricas que mejoran las técnicas asociadas al empleo de cámaras digitales (mayor calidad radiométrica, mayores precisiones, menores costes, mayor alcance, etc.).

La geometría proyectiva es la misma tanto para objeto cercano como para fotogrametría aérea. En fotogrametría aérea, se busca el solape o recubrimiento entre dos fotografías consecutivas para formar un par estereoscópico. De esta forma y mediante la adecuada disposición de las imágenes y la utilización de instrumentos aptos para ello, es posible visualizar el objeto en 3D, por lo que se podría registrar tridimensionalmente. Sin embargo, en aplicaciones de objeto cercano, la ubicación y orientación de las imágenes no cumplen ciertas propiedades geométricas para la formación de un par estereoscópico. En este caso, es más habitual utilizar geometría convergente con múltiples imágenes para cubrir todo el objeto tridimensionalmente. En ambos casos, existen algoritmos que permiten registrar el objeto de manera automática generando una nube de puntos mediante la correlación automática de dos imágenes de la misma zona del objeto.

### 1.1.3.4. Teledetección

El uso de técnicas geomáticas de observación de la Tierra desde satélites (imágenes de sensores ópticos, radar, LiDAR, prospección magnética) está siendo de gran utilidad para el descubrimiento y comprensión de entidades de interés para el patrimonio como ciudades o asentamientos antiguos. De hecho, su utilización se remonta a la década de 1980 cuando el transbordador Columbia, mediante un radar de imágenes, permitió el descubrimiento de asentamientos humanos de la edad de piedra en el desierto del Sáhara (Wiseman & El-Baz, 2007).

La utilización de estas técnicas tiene un coste asumible para un proyecto y no es necesario acceder a la zona con excavaciones, a veces, inaccesibles. Por otro lado, la velocidad de la adquisición y tratamiento de datos no es comparable a ningún otro medio de prospección. Su utilización remota permite registrar información en lugares de difícil acceso debido a su orografía, vegetación, climatología o situación política.

En 2002, arqueólogos alemanes descubrieron y cartografiaron nuevas localizaciones ignotas enterradas de la antigua ciudad de Uruk (Iraq) utilizando magnetómetros, imágenes aéreas e imágenes de satélite (van Ess & Fassbinder, 2005). Y en el verano de 2011, utilizando las imágenes del satélite que proporciona Google Earth, fueron descubiertos en el desierto del Gobi (Mongolia) parte de la Gran Muralla China.



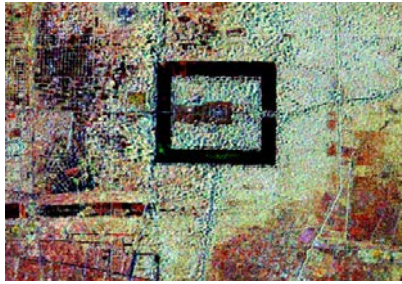


Figura 8: Imagen SAR de la antigua ciudad de Angkor (Camboya) tomada por la NASA.

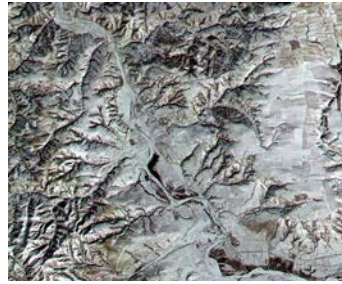


Figura 9: Gran muralla china registrada con ASTER.

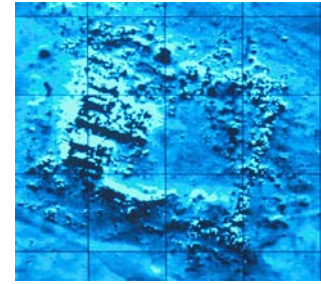


Figura 10: Magnetograma de las ruinas de Uruk (Iraq).

### 1.1.3.5. Sensores láser de barrido

La última tecnología incorporada al mundo de la Geomática (finales del siglo XX), ha sido el registro mediante escáner láser de barrido o LiDAR. Se ha utilizado LiDAR, tanto aéreo como terrestre, para la documentación de monumentos, principalmente porque se pueden registrar gran cantidad de datos tridimensionales muy precisos en un corto espacio de tiempo. Estos datos vienen representados por una nube de puntos con coordenadas XYZ en sistema de coordenadas común, proporcionando al usuario la comprensión de la distribución espacial del objeto. Además, estos datos pueden incluir información adicional, como la intensidad del pulso láser o el color. Esta técnica se ha convertido en una útil herramienta en la documentación del patrimonio cultural, ya que permite modelar tanto superficies lisas como superficies con grabados (English Heritage, 2007).

Las posibilidades del LiDAR para el registro arqueológico se han comprobado con el hallazgo de varios restos arqueológicos, por ejemplo, la fortificación romana encontrada en Yorkshire (Inglaterra) en el año 2000 (figura 11).

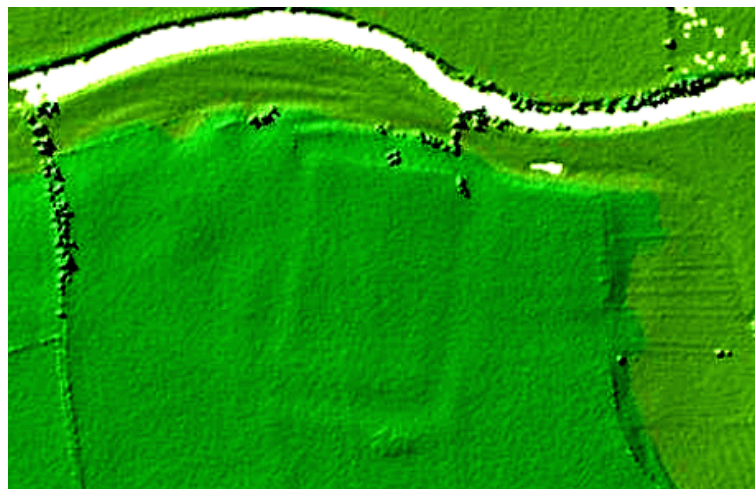


Figura 11: Ejemplo de huella arqueológica de asentamiento humano detectada con LiDAR. (English Heritage, 2013).

Los escáneres láser terrestres también representan un significativo avance en el registro de emplazamientos de valor arqueológico (Mañana-Borrazás, et al., 2009). La velocidad de proceso y la cantidad de datos medidos en el mismo sistema de referencia les aventaja sobre otras técnicas de registro de la información que evidencian menor rendimiento (Topografía) o cobertura espacial (Fotogrametría). Un buen ejemplo sería el registro de abrigos o cuevas con distribuciones irregulares (figura 12).



Figura 12: Registro mediante escáner láser terrestre de cuevas de valor arqueológico en Nottingham (Reino Unido).

## 1.2. Objetivos de la tesis

Los trabajos de adquisición, documentación y registro de la información geométrica se han visto revolucionados con el avance de las tecnologías digitales en todos sus ámbitos. Estas tecnologías avanzan con gran rapidez, viéndose modificadas muchas de las técnicas que hasta ahora se han venido utilizando con el objetivo de representar lo más fielmente posible la realidad. Estas tecnologías digitales persiguen la rapidez, precisión y automatismo de sus operaciones, apoyándose en dispositivos hardware y aplicaciones de software cada vez más complejas.

Una de estas tecnologías es la empleada por sensores de barrido láser para medir objetos. Estos objetos pueden ser de diversa índole, como también lo son los sensores utilizados. La rapidez y calidad de datos que ofrecen es cada vez mayor, lo que supone generar documentos cartográficos prácticamente en tiempo real. Sin embargo, la mejora de estos sensores es más rápida que el desarrollo de aplicaciones informáticas y que las metodologías de tratamiento de la información que generan.

En base a ello, se plantean ciertas tareas que permitirán definir posteriormente los objetivos:

- Analizar los sensores empleados para la adquisición de información que permitan su comparación en parámetros como rendimiento, alcance, precisión, etc.
- Aportar métodos para un tratamiento eficaz de la información, con un enfoque sintético considerando la diversidad de casos que se contemplan en documentación del patrimonio.
- Desarrollar algoritmos de utilidad que se precisan para extraer la información necesaria tomada por estos dispositivos.

Como ámbito o contexto de la investigación, los activos experimentales se han centrado en la adquisición de información útil para la documentación de patrimonio. Esta información abarca un amplio abanico de posibilidades: desde la documentación de amplias zonas de la superficie terrestre hasta el registro de pequeñas piezas arqueológicas, pasando por la representación de elementos arquitectónicos. Todos ellos requieren sensores, aplicaciones y tratamiento diferenciados, pero tienen en común la tipología de datos generados: nubes densas de puntos medidos mediante sensores de barrido láser.

### 1.2.1. Objetivos generales

En la presente tesis, se plantean dos objetivos fundamentales. El primero, sobre el que gira la investigación, es el diseño, desarrollo e implementación de un sistema que mejore los procesos de extracción de la información geométrica necesaria en los procesos de documentación de entidades de interés patrimonial, basándose en la medición mediante sensores láser, tanto aéreos como terrestres.

Por ello, se ha realizado un exhaustivo estudio de la problemática en el registro de datos geométricos utilizando sensores láser, que comprende un análisis de las soluciones actuales aportadas por fabricantes de hardware y software, el desarrollo de nuevos algoritmos o herramientas de aplicación y el establecimiento de un sistema donde, de manera ordenada, se dé solución adecuada al modelado de diferentes tipos de entidades de interés patrimonial.

Como resultado de todo ello, se obtendrá la información geométrica tridimensional de interés y suficiente calidad de los elementos de interés patrimonial que se pretenden documentar mejorando o complementando, en lo posible, las actuales técnicas de registro. En el proceso, también se proponen los parámetros y conclusiones necesarias para, en cada proyecto particular, optar por una técnica u otra de registro de la información.

Para su consecución, se plantea la utilización de sistemas de medición láser aerotransportados, terrestres estáticos y terrestres dinámicos. Estos sistemas utilizan sensores de posicionamiento (GNSS), de orientación (INS), de medición (LiDAR) e incluso de captura de imágenes (sensores ópticos). Por ello, se han analizado las tecnologías y fundamentos de cada uno de ellos.

A través de la comparación entre la técnica basada en sensores láser de barrido y otras técnicas geomáticas, se plantea como segundo objetivo el estudio de la viabilidad de cada alternativa tecnológica láser y desarrollar sus capacidades potenciales para la compleja documentación de entidades patrimoniales. Esta comparación se ha realizado desde un punto de vista topográfico-cartográfico, basándose en el análisis de las precisiones y rendimientos alcanzados, la instrumentación y el software requeridos, así como las necesidades de especialización en el usuario y los costes finales.

En este sentido, se pretende aportar una alternativa viable a la captura de información geométrica, cuyos procedimientos actuales se basan en el empleo de instrumentación topográfica o fotogramétrica. Los instrumentos utilizados son de gran calidad y precisión, pero presentan inconvenientes como puede ser los elevados requisitos de especialización que se precisan en los usuarios y el escaso rendimiento en determinados escenarios de distribución compleja o de gran extensión, lo que repercute de manera directa en los tiempos y el coste del proyecto.

Además, para complementar esta comparación, se han realizado ensayos comparativos en diferentes escenarios que permiten obtener datos objetivos a partir de los resultados extraídos utilizando diferentes técnicas de registro de la información.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos generales de este proyecto se desglosan en una serie de siete objetivos específicos que serán posteriormente tratados en los capítulos en los que se ha estructurado la presente tesis.

El primer objetivo específico se centra en un análisis sintético de las técnicas actualmente utilizadas para la captura de la información geométrica tridimensional, particularizando para el ámbito de la documentación patrimonial. Este análisis ha aportado las diferentes debilidades, fortalezas, ámbitos de utilización y posibilidades, que cada técnica ofrece. Con ello se han establecido los requerimientos mínimos exigibles a las metodologías que se proponen en este documento.

Una vez analizado el resto de técnicas geomáticas, el segundo objetivo específico se basa en el análisis de la potencialidad de los diferentes sistemas de medición láser que se pueden utilizar para el registro de información geométrica de entidades de interés patrimonial. Una posible clasificación de estos sistemas sería: escáner láser aerotransportado (ALS), escáner láser terrestre (TLS) y sistemas de registro móvil (MMS). En este análisis, se ponen de manifiesto las características de cada uno de ellos relacionadas con su precisión, ámbito de utilización, rendimiento, costes económicos, etc.

Como consecuencia de estos dos objetivos específicos, se realiza una comparación entre las técnicas de medición láser y el resto de técnicas geomáticas de medición, destacando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, considerando rendimiento, precisión, flexibilidad, complejidad, costes y otros parámetros, para establecer criterios objetivos de selección en cada proyecto en particular. De esta comparación, se proponen alternativas sinérgicas, ya que las técnicas geomáticas deben ser necesariamente complementarias.

Las características particulares de los datos generados por los sistemas láser han supuesto un cambio importante en el tratamiento de la información geométrica. Una de sus principales características es la alta densidad de información, definida únicamente por puntos definidos por sus coordenadas y otros parámetros adicionales, que imposibilita su gestión con aplicaciones informáticas genéricas.

Por ello, el tercer objetivo específico es el establecimiento de una metodología de tratamiento de estos datos en función de los planteamientos y necesidades de cada proyecto, que permita la obtención de un producto geométrico preciso, manejable y útil para la extracción de la información relevante, pudiendo ser incorporado en sistemas de información geográfica.

Para llevar a cabo esta metodología, el cuarto objetivo específico es el análisis de los diferentes algoritmos o técnicas de clasificación y filtrado de la información existentes que permiten seleccionar los datos de interés para cada caso concreto.

El siguiente objetivo específico se centra en la propuesta de un conjunto de nuevos algoritmos y herramientas informáticas que optimizan el proceso de tratamiento, edición y explotación de la información registrada con un sensor láser. En el desarrollo de nuevas aplicaciones, se han tenido en cuenta las características o necesidades que se plantean en la documentación de patrimonio. Por ejemplo, la clasificación de la tipología de los materiales encontrados en una pieza arqueológica, asentamiento u obra arquitectónica es de especial interés. Por tanto, se han tenido en cuenta características multiespectrales de los objetos además de su caracterización geométrica.

A continuación, el siguiente objetivo específico es la validación de estas nuevas propuestas en diferentes ámbitos de aplicación que abarcan los mencionados sensores disponibles. Estos ámbitos comprenden escalas y objetivos diversos, cubriendo el amplio abanico de posibilidades que ofrece la documentación de patrimonio. En cada caso, también se proponen los parámetros y conclusiones necesarias para optar por una técnica u otra de registro de la información.

Para concluir, el último objetivo específico es la validación del algoritmo de clasificación LiDAR desarrollado en esta tesis, mediante la realización de pruebas objetivas propuestas por un organismo cualificado como la Asociación Internacional de Fotogrametría y Teledetección (ISPRS). Estas pruebas permiten la valoración de la eficacia de este tipo de algoritmos, extrayendo datos objetivos de funcionamiento, conclusiones sobre sus fortalezas y debilidades así como la comparación con otros algoritmos existentes.



## 1.3. Estructura de la tesis

Este documento se ha estructurado en diez capítulos, agrupados en cinco bloques, y seis anexos.

El primer bloque comprende la introducción y los antecedentes, que abarca los dos primeros capítulos. El primer capítulo se realiza una presentación y justificación de la problemática en el registro de información geométrica para el patrimonio. En él, se detallan los objetivos y estructura de la tesis. En el segundo capítulo, se abordan todos aquellos sistemas de registro y análisis de la información geométrica, excepto los basados en técnicas láser que se tratarán en capítulos posteriores. Estos sistemas son los basados en técnicas topográficas, geodésicas, fotogramétricas y de teledetección y, por ello, se les ha denominado “genéricos”. En cada apartado, se citan brevemente los instrumentos existentes y técnicas posibles, destacando aspectos como precisión, ámbito de uso, rendimiento, etc.

El segundo bloque se centra en los materiales y métodos empleados para la realización de la tesis, comprendiendo los seis capítulos siguientes. El tercer capítulo de la tesis analiza los sistemas de registro basados en técnicas láser, comenzando por los sensores aerotransportados y concluyendo con los sensores terrestres, tanto en su variante estática como móvil. Se exponen con detalle las características técnicas y funcionamiento de cada uno de ellos, así como los ámbitos de aplicación y productos generados. Se analizan las posibles fuentes de error que determinan la precisión que puede alcanzar el sistema. Se concluye el tema con la tendencia futura de éstos y con la comparación con el resto de sistemas de registro de la información geométrica, aportando sugerencias de utilización para caso concreto. Esta comparación es posible como consecuencia del análisis de todos los componentes desarrollados en el capítulo anterior.

El cuarto capítulo está dedicado al modelo de datos y procesamiento de la información procedente de sistemas láser. En él, se detallan las tareas a realizar para poder generar la información útil y necesaria del objeto analizado. Se muestran en una secuencia ordenada, haciendo especial énfasis en los riesgos que se pueden correr en algunas fases delicadas. También se analiza el funcionamiento de los diferentes algoritmos de filtrado y clasificación de los puntos, pilar central del procesamiento de la información LiDAR.

En el quinto capítulo se propone una alternativa para optimizar los modelos existentes. Tras el análisis previamente realizado, se proponen nuevos algoritmos y herramientas informáticas que mejoran el rendimiento en la gestión de la información LiDAR. Además, se propone un sistema donde, de manera ordenada, se utilizan las herramientas necesarias para extraer la información útil que cada proyecto precisa.

Con los algoritmos propuestos en el capítulo anterior, se define informáticamente el modelo en el sexto capítulo. Se muestra el diagrama de flujo de las herramientas, así como el manual de referencia donde se aportan los detalles a nivel de programación de los algoritmos propuestos.

Con todo ello, en el séptimo capítulo se procede a validar el sistema propuesto con siete casos diferentes que abarcan desde proyectos con sensores aerotransportados, proyectos con sensores terrestres estáticos a media y corta distancia y un proyecto con un sensor terrestre móvil. Asimismo, se ha realizado una comparación con datos objetivos de diversas zonas de prueba propuestas por la ISPRS para la evaluación del funcionamiento de algoritmos de clasificación LiDAR. Para concluir este bloque, el capítulo octavo de la tesis, expone de manera crítica los resultados obtenidos en los diferentes algoritmos propuestos y activos experimentales realizados.

A continuación, el tercer bloque, se ha dedicado a las conclusiones y líneas futuras de investigación. En el noveno capítulo se exponen las conclusiones alcanzadas en este trabajo de investigación y el décimo capítulo incluye posibles futuras líneas de investigación que se intentarán abordar próximamente.

El cuarto bloque está exclusivamente dedicado a la bibliografía y referencias utilizadas en esta investigación.

Para finalizar la documentación, se incluyen los anexos. El primero de ellos, Anexo A, está dedicado a los fundamentos de la medición láser, ahondando en las diferentes técnicas de medición, sus características, precisiones o rendimientos. A continuación, en el Anexo B se ofrece un amplio listado de dispositivos de medición láser en diferentes ámbitos: aerotransportado, batimétrico, terrestre estático y terrestre móvil. Además, se citan brevemente los sistemas inerciales más habituales, por ser parte fundamente de casi todos los sistemas LiDAR. Análogamente, el Anexo C está dedicado al análisis de las diferentes aplicaciones informáticas disponibles para el tratamiento de la información LiDAR. En el Anexo D se detallan las características de los sistemas de referencia por ser la infraestructura de datos necesaria para cualquier información geométrica. El Anexo E está centrado en los procedimientos de usuario para la utilización de estas herramientas informáticas. Por último, en el Anexo F se ofrece un listado de términos, definiciones y acrónimos para la correcta interpretación de la tesis, así como el listado de figuras y tablas de este documento.



# Sistemas genéricos de registro y análisis de información geométrica

## 2.1. Introducción

La Geomática es el término científico moderno que hace referencia al conjunto de ciencias en las cuales se integran los medios para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica, también llamada información espacial o geoespacial.

El término fue acuñado en 1969 por Bernard Dubuisson e integraría a todas las ciencias de base y a las tecnologías utilizadas para el conocimiento del territorio como la Teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) y otras ciencias relacionadas. De esta forma, las ciencias y técnicas incluidas en esta definición podrían ser: Topografía, SIG, Teledetección, Navegación, GPS/GNSS, Geofísica, Cartografía, Fotogrametría, Geodesia, Geografía, etc.

Las técnicas geomáticas utilizadas para la documentación del patrimonio son aquellas técnicas y prácticas que tienen como objetivo la recolección, análisis e interpretación de los datos espaciales orientados hacia las edificaciones, lugares históricos, monumentos, artefactos, etc., que son considerados dignos de preservar para el futuro.

Una vez se ha recopilado la información necesaria del objeto a documentar, comienza el proceso de modelado digital. Las técnicas actuales realizan este modelado lo más automático posible para aprovechar las propiedades de velocidad, objetividad y precisión en las extracción de resultados o cálculos que se puedan realizar.

Los modelos digitales resultan muy útiles en una gran variedad de disciplinas. En la presente tesis se está tratando la casuística de aplicaciones al patrimonio, pero es también destacable su utilidad en aplicaciones industriales, para el modelado de formas y cálculo en la resistencia de materiales; en ingeniería civil, para todos los cálculos concernientes con infraestructuras como cálculo de perfiles longitudinales y transversales de obras lineales o cálculo de movimientos de tierras; en gestión medioambiental y urbanística; en aplicaciones de transporte, tanto terrestres, como aéreas o marítimas; en Medicina y Biología, para la

generación de modelos de órganos vivos o prótesis. Cada disciplina requerirá una definición del modelo, pues el tipo de modelado y objetivo son obviamente diferentes. Esta definición del modelo vendrá condicionada por los costes máximos y la precisión requerida que, a su vez, condicionará el método de registro y tratamiento de la información y, por tanto, la técnica o instrumentación a utilizar.

Las técnicas geomáticas actuales son, generalmente, objetivas, rápidas y rentables. Aquellas que utilizan un sensor, se basan en el aprovechamiento del espectro electromagnético y se pueden clasificar en activas, cuando emiten un haz energético (luz, ultrasonidos o rayos X) que es recogido después de reflejarse sobre la superficie observada, o pasivas, si recogen la energía electromagnética que procede de los objetos reflejada por la luz solar o emitida por su rango térmico. Las técnicas activas requieren un transmisor y un receptor por lo que son mecánicamente más complejas que las técnicas pasivas. Por el contrario, los sensores pasivos suelen ser muy baratos porque, en la mayoría de los casos, sólo es necesaria una cámara digital. Sin embargo, tienen problemas para encontrar correspondencias entre imágenes 2D, lo que no siempre tiene una única solución.

Según esta definición, se consideran activas las técnicas basadas en Topografía clásica (si utilizan distancias), en medición con satélites GNSS o mediante sensores láser o radar. Igualmente, se clasifican como pasivas las técnicas basadas en Fotogrametría o Teledetección.

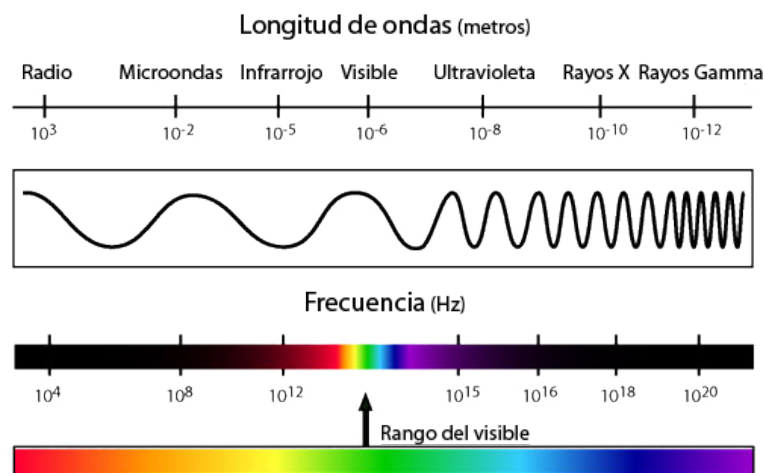


Figura 13: El espectro electromagnético.

Tantos los sensores pasivos como los activos se suelen clasificar en función de si generan la imagen con los datos medidos.

En la siguiente clasificación se realiza una división en función del tipo de sensor y si puede formar imagen. Sólo se han considerado sistemas digitales.

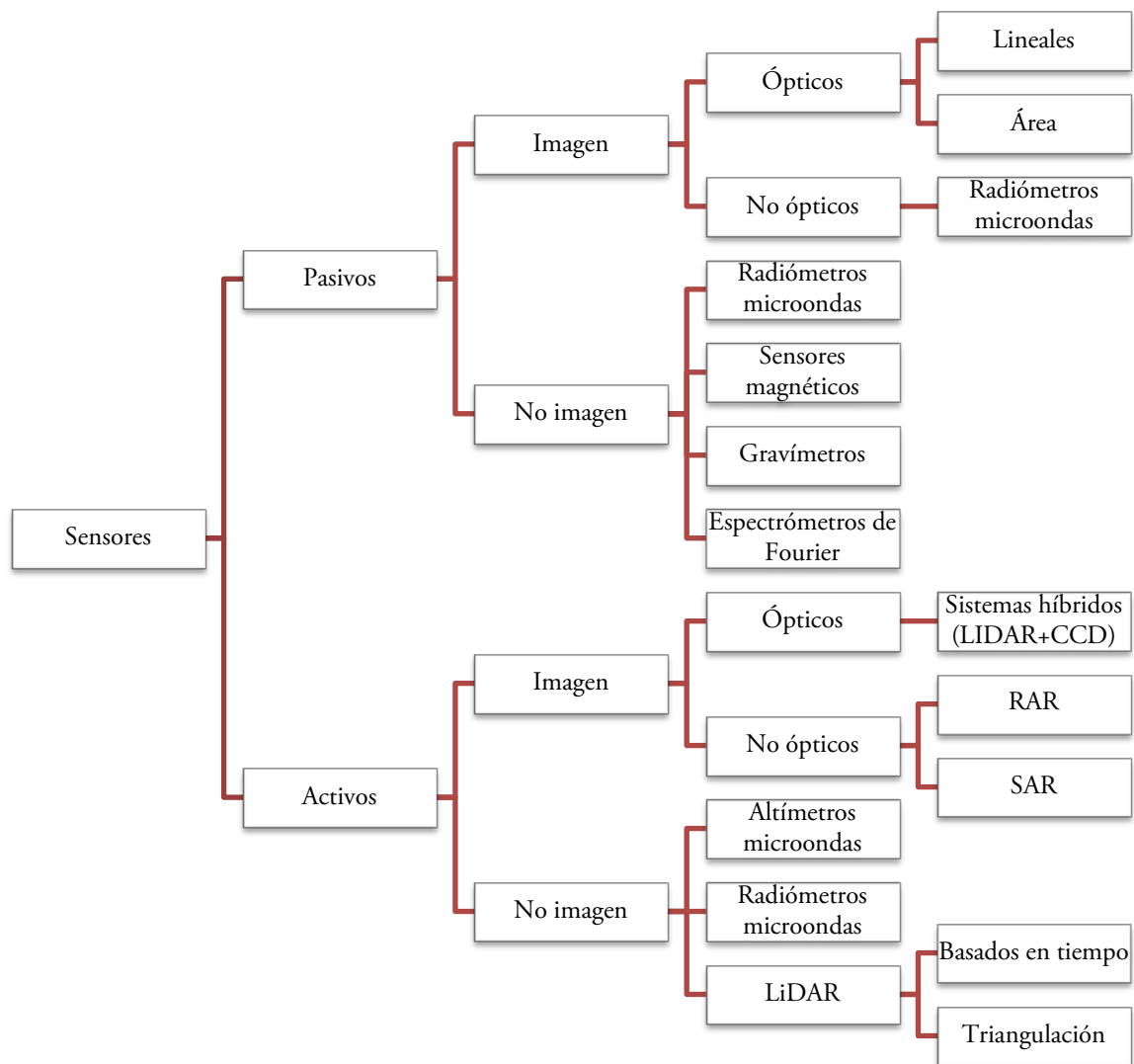


Figura 14: Cuadro resumen de tipos de sensores.

También se podría realizar una clasificación de los métodos en función de la forma de obtención de la distancia. Se podrían clasificar como directos cuando miden directamente la distancia desde el sensor al objeto o indirectos si la distancia es obtenida a posteriori mediante cálculos.

Por último, otra fuente posible de datos para modelar sería la digitalización de documentación existente, ya sea en formato tangible (cartografía impresa) o digital (por ejemplo, en la vectorización de documentos raster). A su vez podría ser automática, utilizando un escáner con reconocimiento de formas, o manual, digitalizando con un ordenador y una aplicación específica.

En el esquema de la figura 15 se presentan las técnicas de medición en función del tamaño del objeto medido frente a la precisión necesaria. Este gráfico no refleja las diferentes condiciones o limitaciones de uso que pueden tener cada uno de ellos.

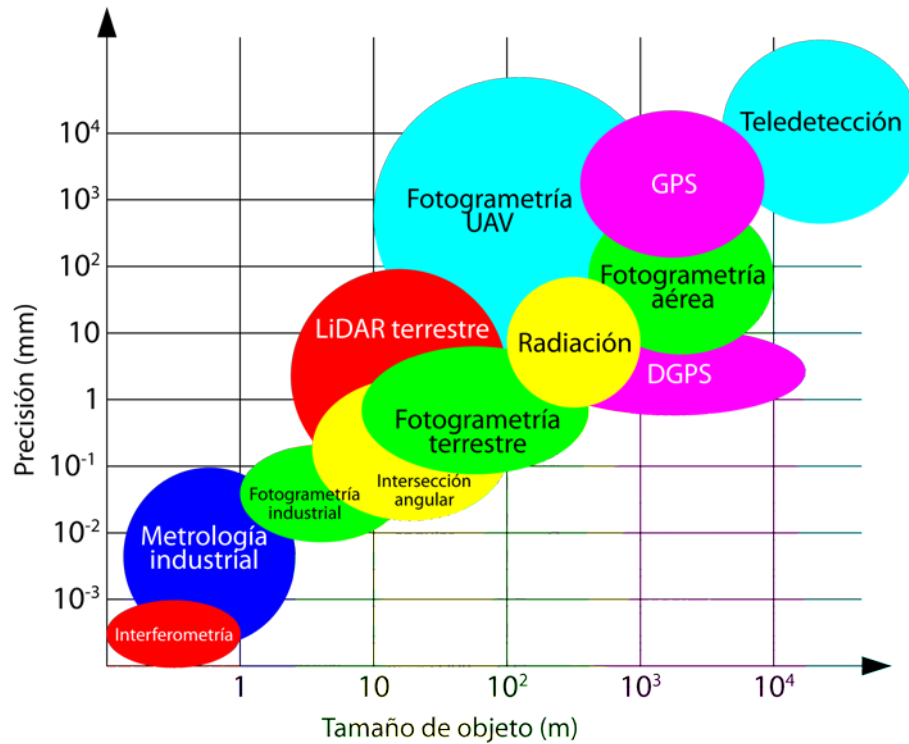


Figura 15: Gráfico que relaciona métodos con precisión y tamaño del objeto (Luhmann, et al., 2006).

Como se ha establecido en el capítulo 1, el objetivo de esta tesis es la documentación geométrica de entidades cuyas dimensiones pueden ser muy variables. Este documento se centra en la optimización y desarrollo de nuevos algoritmos a partir de datos obtenidos con dispositivos de barrido láser. No obstante, convendría reseñar las diferentes técnicas geomáticas e instrumentación existentes para tal efecto e incluso realizar una comparación con la técnica láser. Por ello, a continuación se ha considerado oportuno describir las siguientes técnicas: técnicas topográficas clásicas, técnicas de posicionamiento global por satélite, técnicas fotogramétricas y teledetección.

## 2.2. Técnicas topográficas clásicas

### 2.2.1. Introducción

Se entiende por métodos topográficos a las distintas técnicas que se utilizan en la toma de medidas métricas y angulares, así como al tratamiento de estos datos, para la realización de un trabajo topográfico, tanto por lo que concierne a la planimetría como a su altimetría (Chueca Pazos, et al., 1996). De hecho, estos métodos han sido, tradicionalmente, divididos entre métodos topográficos planimétricos y métodos topográficos altimétricos.

Por tanto, estos métodos permiten la obtención con alta precisión de coordenadas de puntos respecto tanto a un sistema local o arbitrario como a un sistema definido y materializado. Para la obtención de estas coordenadas se realizan medidas angulares y/o de distancia mediante diferentes tipos de instrumentos y cálculos sobre ellas y otros datos suministrados por el operador.

Las técnicas topográficas han sido ampliamente utilizadas para el registro y documentación de entidades de interés patrimonial, sobre todo si sus dimensiones no eran grandes. Por ejemplo, son muy útiles para el registro de pequeñas porciones de terreno como podría ser un asentamiento humano. También adquieren gran protagonismo en el registro de murales o fachadas arquitectónicas mediante la utilización de métodos topográficos basados en la intersección de visuales o mediante estaciones totales con medición electromagnética de distancias sin prisma reflector. Otro de los ámbitos de aplicación es el registro geométrico dentro de lugares con cubierta como túneles, cavernas o interiores de edificaciones. En el primer ejemplo, su utilización puede verse relegada por el empleo de receptores GNSS, pero en los dos últimos casos no sería posible, dada la imposibilidad de tener cielo abierto para la recepción de señal procedente de los satélites.

### 2.2.2. Instrumentación

#### 2.2.2.1. Teodolito

El instrumento clásico de medición de medidas angulares comúnmente utilizado ha sido el teodolito. El teodolito tuvo en su origen un fundamento constructivo óptico-mecánico, aunque actualmente se utiliza su versión electrónica. Hoy en día, los teodolitos electrónicos pueden llegar a tener una precisión de medio segundo sexagesimal, lo que permite realizar medidas angulares de alta precisión.



Figura 16: Teodolito óptico-mecánico Wild T2.

Las medidas angulares que puede realizar son tanto horizontales como verticales, por lo que puede ser utilizado tanto en métodos planimétricos como altimétricos. Antiguamente, con la ayuda de miras estadimétricas, permitían la medición de distancias, hoy relegado por las estaciones totales, dotadas de distanciómetro.

Los teodolitos electrónicos incorporan pantallas alfanuméricas de cristal líquido (LCD), *leds* de avisos, iluminación independiente de la luz solar, calculadora y la posibilidad de guardar información en formato electrónico, lo cual permite transferirla y procesarla en ordenadores personales. Además, vienen provistos de diversos programas que permiten, entre otras capacidades, el cálculo de coordenadas en campo, replanteo de puntos de manera sencilla y cálculo de diferentes métodos topográficos. Se componen de las mismas partes y funciones que uno óptico. El estacionamiento es similar, aunque cuenta con niveles electrónicos que facilitan la tarea. Los tres ejes y sus errores asociados también están presentes: el de verticalidad, que con la doble compensación ve reducida su influencia sobre las lecturas horizontales, y los de colimación e inclinación del eje secundario, con el mismo comportamiento que en un teodolito clásico, salvo que el primero puede ser corregido por software, mientras que en el segundo la corrección debe realizarse por métodos mecánicos.



Figura 17: Teodolito electrónico Leica TM6100A.

#### 2.2.2.2. Distanciómetro

El distanciómetro es el instrumento que permite la medición de una distancia mediante el cálculo de la propagación de una onda electromagnética emitida y captada por el equipo. Antiguamente, estos distanciómetros podían incorporarse a teodolitos para permitir la medición de precisión de grandes distancias. Hoy en día, su utilización se limita prácticamente al empleo en el interior de instalaciones, existiendo distanciómetros para la medida de distancias sin necesidad de receptor con precisión de micras, y sencillos y baratos (menos de 700 €) distanciómetros de mano que miden distancias cortas con precisión milimétrica.



Figura 18: Distanciómetro Wild Distomat instalado sobre teodolito Wild T2.



Figura 19: Distanciómetro de mano Leica DISTO.



Figura 20: Distanciómetro Leica  $\mu$ -base con precisiones micrométricas.

### 2.2.2.3. Equialtímetro

También denominado nivel topográfico, es el instrumento que tiene como objetivo la medición del desnivel o diferencia de altura entre puntos. Actualmente, pueden ser ópticos o digitales y se basan en la medición de visuales horizontales sobre miras situadas en los puntos de los que se desea conocer el desnivel. Las distancias de cada nivelada no suelen ser elevadas pero como concatenación de éstas, se pueden conseguir poligonales de kilómetros con precisiones milimétricas.

La utilización de niveles ópticos precisa la lectura manual sobre miras estadimétricas, mientras que los niveles digitales incorporan la medición automática sobre miras con códigos de barras. Además, al ser digitales, incorporan la medición electrónica y automatizada de los datos y diversos programas para el cálculo rápido de las cotas de los puntos medidos. Un nivel digital puede tener un precisión entre 0.3 mm y 0.9 mm por cada kilómetro y un coste entre 6 mil y 7 mil euros.



Figura 21: Nivel óptico automático Wild NA2 y mira estadimétrica.



Figura 22: Nivel digital Leica DNA y mira para lectura óptica y digital.

### 2.2.2.4. Plomada cenit/nadir

Una plomada es el instrumento que permite la determinación de la vertical sobre un punto. Actualmente, son instrumentos basados en tecnología láser que permiten trasladar verticalmente puntos de una superficie a otra con precisión milimétrica en 100 m.

Son muy útiles a la hora de transferir coordenadas a pozos de cierta profundidad o entre diferentes plantas de una edificación.



Figura 23: Plomada láser cenit/nadir FOIF DZJ200.



### 2.2.2.5. Estaciones totales

Se denomina estación total a un instrumento topográfico electro-óptico que incorpora un distanciómetro a un teodolito electrónico. De esta forma, se facilita la adquisición de coordenadas de puntos ya que permite medir ángulos horizontales y verticales, así como distancias con gran precisión. Es el aparato topográfico utilizado en la mayoría de las observaciones en los diversos métodos topográficos. Genéricamente, se les denomina estaciones totales porque tienen la capacidad de medir ángulos y distancias, lo cual requería previamente de varios instrumentos.

Físicamente, poco difieren a los teodolitos electrónicos. La medida de ángulos es idéntica a estos y las lecturas de distancia se realizan mediante una onda electromagnética portadora con distintas frecuencias que rebota en un prisma ubicado en el punto a medir y regresa, tomando el instrumento el desfase entre las ondas. Algunas estaciones totales presentan la capacidad de medir “a sólido”, lo que significa que no es necesario un prisma reflectante, facilitando la medida de puntos no accesibles.



Figura 24: Prisma reflectante de distancias Leica.

Las estaciones totales modernas incorporan varios accesorios y herramientas que facilitan la recogida de la información, como pueden ser la incorporación de una cámara óptica de tal manera que se pueden seleccionar puntos directamente en la pantalla táctil del equipo, comunicación *Bluetooth* o 3G con otros dispositivos, consolas móviles acoplables al bastón del prisma para que una sola persona pueda realizar la medición mediante una estación motorizada, etc. Estas estaciones llegan a tener 0.5" de precisión angular y 1 mm  $\pm$  2 ppm de precisión en las distancias. Su precio oscila entre 10 mil € y 35 mil €.

Más aún, Trimble ofrece el modelo VX que es una estación total combinada con un sistema de imagen y un escáner láser. El escáner tiene una distancia máxima de 250 m, con una precisión de 10 mm a 150 m y una velocidad de hasta 15 puntos por segundo. Las imágenes pueden ser capturadas con una resolución de 3.1 megapíxeles. Su precio oscila los 50 mil euros (Trimble, 2013).



Figura 25: Estación total Trimble S8 de 1" de precisión angular y 2 mm  $\pm$  2 ppm de precisión en distancias.



Figura 26: Estación total Topcon OS de 1" de precisión angular y 2 mm  $\pm$  2 ppm de precisión en distancias.



Figura 27: Estación total Leica TDRA 6000 de 0.5" de precisión angular y 1 mm  $\pm$  2 ppm de precisión en distancias.



### 2.2.3. Métodos topográficos

Los métodos topográficos tradicionalmente se han dividido entre planimétricos y altimétricos en función de las coordenadas objeto del cálculo. Para la resolución de las coordenadas de los puntos incógnita será necesario el conocimiento de las coordenadas de otros puntos sobre un sistema de referencia que representarán la materialización de este sobre la realidad medida. El sistema de referencia podrá ser local o arbitrario u oficial. Este dato es importante para saber qué cálculos o transformaciones afectan a las medidas realizadas.

Los métodos altimétricos tienen como objetivo el cálculo de la cota o altitud de puntos. Son métodos sencillos y apenas precisan de un punto de cota conocida en el sistema de referencia establecido. Básicamente son dos los métodos utilizados: nivelación geométrica y nivelación trigonométrica.

Los métodos planimétricos tienen como objetivo el cálculo de las coordenadas planimétricas de uno o varios puntos. Se basan en los cálculos trigonométricos para su resolución y dependerán del tipo de observaciones disponibles, es decir, si se dispone de observaciones de ángulo y/o distancia. Según el sistema de referencia en el que se encuentren los puntos conocidos, habrá que tener en cuenta características como la esfericidad terrestre o la proyección cartográfica utilizada. Los métodos planimétricos básicos son: radiación, poligonación, intersección directa, intersección inversa e intersección mixta.

La utilización combinada de los diferentes métodos topográficos sobre un conjunto de puntos da lugar a las redes topográficas cuya resolución suele ser realizada mediante técnicas de mínimos cuadrados (MM.CC.).

#### 2.2.3.1. Nivelación geométrica

Se basa en la determinación de los desniveles utilizando un equialtímetro. Su precisión es superior que la nivelación trigonométrica, pudiendo ser submilimétrica por cada kilómetro, dependiendo del instrumento utilizado.

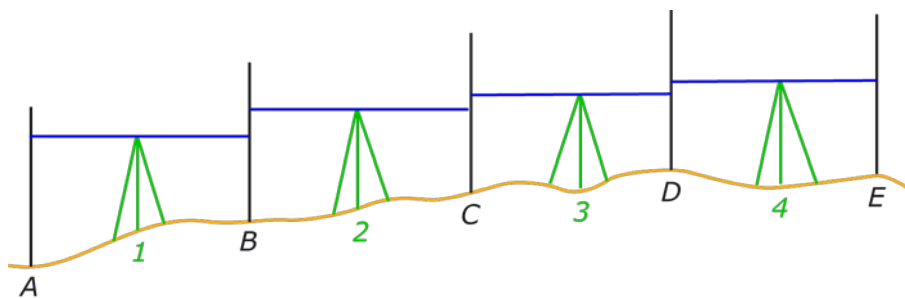


Figura 28: Ejemplo de nivelación geométrica entre los punto A y E.

### 2.2.3.2. Nivelación trigonométrica

Se basa en la determinación de los desniveles utilizando aparatos con medida de ángulos cenitales y distancias, es decir, hoy en día, estaciones totales. Su precisión es de orden centimétrico por kilómetro.

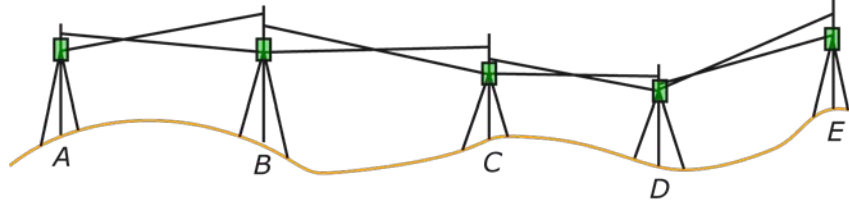


Figura 29: Ejemplo de nivelación trigonométrica entre los punto A y E.

### 2.2.3.3. Radiación

Método topográfico basado en la determinación de las coordenadas rectangulares de un punto a partir de medidas de ángulo y distancia desde un punto de coordenadas conocidas, denominado polo de radiación. Es el único método que no incluye análisis de errores y tolerancias, siendo el utilizado para hacer levantamientos básicos topográficos.

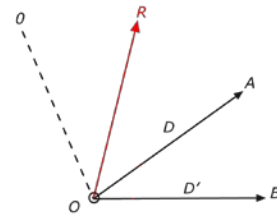


Figura 30: Radiación desde el polo de radiación O a los puntos A y B.

### 2.2.3.4. Poligonación

Método topográfico adecuado para la determinación de las coordenadas de puntos intermedios entre dos extremos, normalmente, de coordenadas conocidas. Se puede entender como una concatenación de radiaciones donde cada tramo es medido dos veces. Tiene comprobación aunque con cierta limitación matemática. Hoy en día, está prácticamente relegado a una utilización dentro de túneles y lugares cubiertos. Suele servir para dar coordenadas a estaciones que harán de polo de radiación en levantamientos de zonas extensas.

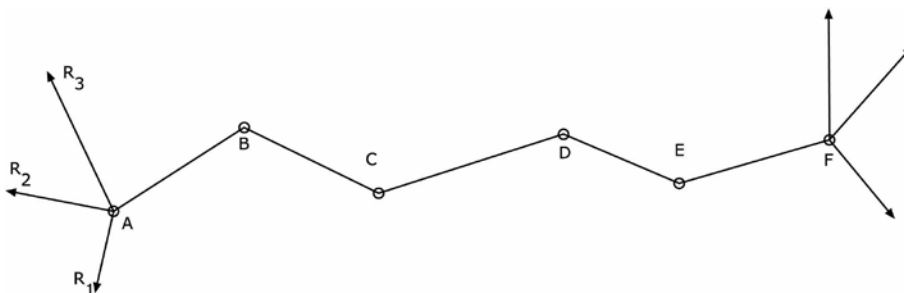


Figura 31: Poligonal entre los puntos de coordenadas conocidas A y F, pasando por los puntos incógnita B, C, D y E.

### 2.2.3.5. Intersección directa

Método topográfico para la determinación de las coordenadas de un punto a partir de las observaciones exclusivamente angulares desde, al menos, dos puntos de coordenadas conocidas. Su utilización se justifica cuando el punto incógnita no es estacionable. Su precisión depende, además de la precisión del instrumento, de la geometría de la figura y las distancias desde las estaciones al punto.

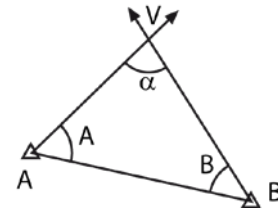


Figura 32: Intersección directa desde las estaciones A y B al punto incógnita V.

### 2.2.3.6. Intersección inversa

Este método topográfico se emplea en la determinación de las coordenadas de un punto a partir de las observaciones exclusivamente angulares a, al menos, tres puntos de coordenadas conocidas. Tiene una utilización más extensa que la intersección directa puesto que permite el cálculo con precisión de las coordenadas de un punto cualquiera, a partir de las observaciones a un conjunto de coordenadas conocidas. Es muy utilizado en ingeniería y espacios interiores. Existe una variante de este método donde se utilizan las observaciones angulares desde dos puntos de coordenadas desconocidas a dos puntos de coordenadas conocidas, denominado problema de Hansen.

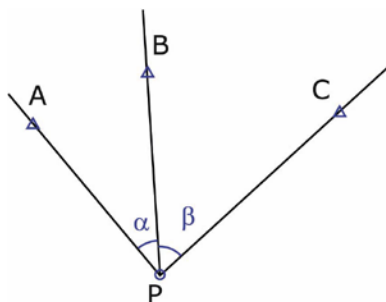


Figura 33: Intersección inversa en el punto P utilizando las estaciones A, B y C.

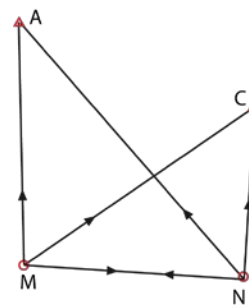


Figura 34: Problema de Hansen para calcular las coordenadas de los puntos M y N a partir de las estaciones A y C.

### 2.2.3.7. Intersección mixta

Método topográfico resultado de la combinación de los dos métodos anteriores o por la inclusión de observaciones de distancia. Se aprovecha en mayor medida el potencial de las estaciones totales por lo que es el método más utilizado. Aumenta en precisión a los dos métodos anteriores, puesto que los distanciómetros suelen tener menor desviación típica a priori que los teodolitos.

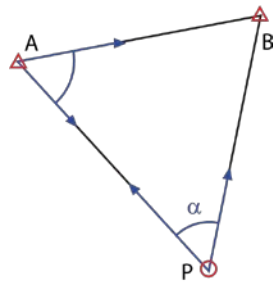


Figura 35: Intersección mixta con medidas angulares desde el punto incógnita P y la estación A.

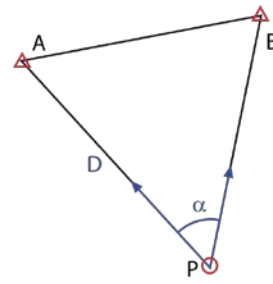


Figura 36: Intersección mixta con medidas de ángulo y distancia desde el punto P a las estaciones A y B.

La combinación de estos métodos planimétricos da lugar a la formación de redes topográficas que mejorarán la precisión en el cálculo de las incógnitas.

### 2.2.3.8. Redes topográficas

Tanto los métodos altimétricos como los planimétricos permiten un cálculo conjunto utilizando la técnica de los mínimos cuadrados (MM.CC.). Este tipo de algoritmos permite emplear todas las observaciones realizadas en campo, pudiendo incluir pesos en cada una de ellas y obteniendo como resultado los valores incógnita con indicación de su precisión. De hecho, es el método de cálculo utilizado para la compensación de redes topográficas, tanto planimétricas como altimétricas, debido a la redundancia de observaciones que se plantean. Además, permite utilizar test estadísticos para la localización de errores. Esta técnica de cálculo tiene amplias ventajas sobre los métodos clásicos de cálculo pero tiene la desventaja que, en el caso planimétrico, precisa de valores iniciales o aproximados.

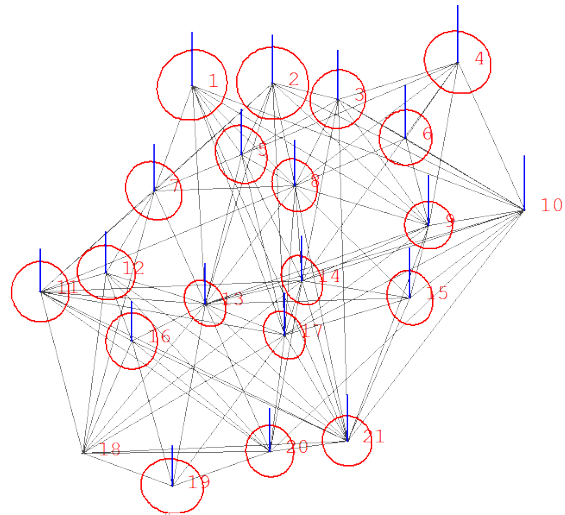


Figura 37: Ejemplo de red topográfica donde se muestran de color negro todas las observaciones que se ha realizado, de color rojo las elipses de incertidumbre planimétrica y de color azul la incertidumbre altimétrica en cada punto. Tanto las elipses como las barras altimétricas están obviamente exageradas.

## 2.3. Técnicas de Posicionamiento Global por Satélite

### 2.3.1. Introducción

Un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) consiste en una constelación de satélites artificiales alrededor de la Tierra que transmite señales utilizadas para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, para fines de navegación, transporte, geodésicos, hidrográficos, agrícolas, y otras actividades.

De esta forma, un sistema de navegación basado en satélites artificiales puede proporcionar a los usuarios información sobre la posición y la hora (cuatro dimensiones) con una gran exactitud, en cualquier parte del mundo, las 24 horas del día y en cualquier condición climatológica.

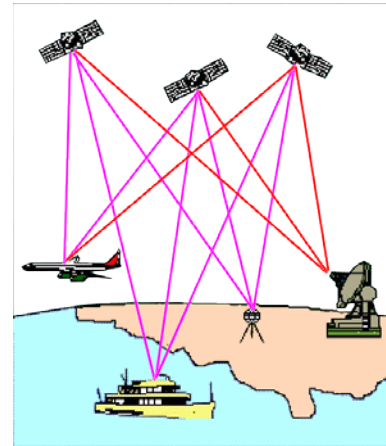


Figura 38: Sistema GNSS.

La determinación de una posición con GNSS consigue un objetivo fundamental de la Geodesia: la determinación absoluta de una posición con precisión uniforme en todos los puntos sobre la superficie de la Tierra. Utilizando la Geodesia clásica y técnicas topográficas, la determinación de la posición es siempre relativa a los puntos de partida del trabajo y la precisión obtenida depende de la distancia a este punto. Pero se podrían destacar otras ventajas, como la velocidad en el cálculo de las coordenadas de los puntos, pudiéndose realizar incluso en tiempo real con precisión centimétrica. Además, en observación GNSS no es necesario tener visibilidad entre los puntos referencia y móvil para el cálculo de la línea, mientras que en topografía clásica resulta imprescindible. Por otro lado, en la mayoría de los trabajos de topografía clásica es necesario dos operarios trabajando con el instrumento de topografía y el elemento reflector, respectivamente; en GNSS, es posible tener bien protegida la estación de referencia y trabajar una sola persona con el receptor móvil.

Por lo tanto, el GNSS ofrece ventajas sobre las técnicas convencionales, lo que ha provocado que las estaciones totales estén siendo progresivamente desplazadas por el uso de receptores GNSS en ciertos trabajos topográficos. La Geodesia es fundamental para el GNSS y, a la inversa, el GNSS se ha convertido en su principal herramienta. Esto se hace evidente si se repasan los objetivos principales de la Geodesia:

- Establecer y mantener las redes de control geodésico tridimensionales nacionales y globales en tierra, teniendo en cuenta la naturaleza cambiante de estas redes debido al movimiento de las placas tectónicas.

- Medición y representación de fenómenos geofísicos (movimiento de los polos, mareas terrestres y movimiento de la corteza).
- Determinación del campo gravitacional de la Tierra, incluyendo las variaciones temporales.

Sin embargo, no siempre es posible el uso del GNSS en todos los trabajos topográficos, principalmente cuando no puede recibir las señales de los satélites debido a la presencia de edificaciones, espesura arbórea, etc. Por tanto, no se podrá trabajar con receptores GNSS en zonas bajo cubierta, túneles o en el registro de puntos situados sobre elementos verticales, como fachadas de edificios, pilares, etc. Además, la mayor precisión de la estación total (pocos milímetros frente a los centímetros del GNSS), la hacen todavía imprescindible para determinados trabajos, como la documentación de detalle de determinados objetos o trabajos de ingeniería de gran precisión.

La mayoría de los sistemas son pasivos, es decir, el usuario no tiene que emitir señal de ningún tipo. Las precisiones esperadas en navegación se obtienen solamente utilizando un receptor. Pero si se utilizan dos receptores observando simultáneamente, las precisiones que se pueden alcanzar son, actualmente, de menos de 5 mm, válidas en el ámbito de la Geodesia y la Topografía.

Un sistema GNSS está constituido por tres sectores fundamentales: Espacial, de Control y Usuario (Hofmann-Wellenhof, et al., 2001).

El sector espacial está compuesto por los satélites circundantes a la Tierra. Estos transmiten señal de tiempos sincronizados, parámetros de posición de los satélites e información adicional del estado de salud de los satélites sobre las dos portadoras. Por ello, la medida del tiempo ha de ser precisa y cada satélite contiene varios osciladores de alta precisión (de rubidio, cesio o hidrógeno), con estabilizadores muy precisos dando medidas de tiempo del orden de  $10^{-14}$  segundos.



Figura 39: Satélite GPS.

El sector control tiene la función de realizar el seguimiento continuo de los satélites, calcular su posición precisa, transmisión de datos y la supervisión necesaria para el control continuo de todos los satélites del sistema.

En el caso del sistema NAVSTAR (*NAVigation System And Ranging*), existen cinco estaciones de seguimiento; una principal en Colorado Springs, y otras cuatro distribuidas en longitud geográfica homogéneamente por todo el mundo: Ascensión, Diego García, Kwajalein y Hawái.



Figura 40: Distribución de las estaciones de control de la constelación NAVSTAR.

Los datos de las estaciones de seguimiento, cuyas posiciones son perfectamente conocidas, son transmitidos a la estación principal de control. Aquí las órbitas de los satélites son predichas junto con las correcciones del oscilador de los satélites. Estos datos son transmitidos al correspondiente satélite, formando una parte esencial del mensaje-satélite.

El segmento de usuarios comprende cualquier receptor que reciba las señales, determinando su posición y/o la hora.

Un receptor GNSS topográfico comprende los siguientes elementos:

- El equipo de campo, que estaría compuesto de los siguientes elementos:
  - Antena: Encargada de recibir y amplificar la señal recibida por los satélites.
  - Receptor: Decodifica la señal recogida por la antena para convertirla en información legible.
  - Terminal o Unidad de Control: Ordenador de campo que muestra la información transmitida por los satélites y recoge todos los datos útiles para su posterior cálculo.



Figura 41: Antena GNSS.



Figura 42: Receptor.



Figura 43: Terminal.

- Equipo de gabinete: Este se utilizará cuando se desee conseguir una gran precisión utilizando el GNSS en modo diferencial y está compuesto por hardware y software de gestión y cálculo de datos.



### 2.3.2. Sistemas de posicionamiento actuales

En el origen de los sistemas de posicionamiento utilizando satélites en la década de los 70 del siglo pasado, dos fueron los países que iniciaron una carrera para liderar la tecnología, Estados Unidos y la Unión Soviética, dirigida principalmente al sector militar. Debido a la disolución de la Unión Soviética, su proyecto GLONASS se vio abandonado, dejando en solitario el sistema GPS americano que siguió ampliando su mercado, posibilitando su uso en el sector civil. Con el avance tecnológico, fueron apareciendo cada vez más dispositivos y cada vez más económicos que utilizaban esta tecnología para el posicionamiento en tiempo real con mayor precisión. Actualmente, el sistema GPS es líder de un gran mercado al cuál han querido acceder otras economías mundiales, por lo que actualmente existen varios proyectos para poder competir o complementar, al menos en parte, con este sistema.

Particularizando sobre el mercado del posicionamiento con objetivos de registro, existe un alto porcentaje de dispositivos que reciben y tratan las observaciones provenientes tanto del sistema GPS como del sistema GLONASS, que son los únicos actualmente operativos. Incluso, los equipos más modernos, ya están concebidos para futuros proyectos como Beidou o Galileo. A continuación, se exponen las características de los sistemas de posicionamiento actuales.

#### 2.3.2.1. NAVSTAR

El Sistema de Posicionamiento Global (NAVSTAR-GPS) desarrollado por Estados Unidos fue puesto en funcionamiento en 1973 y se planificó a partir de los satélites del Departamento de Defensa con el objetivo de mejorar el sistema TRANSIT, de medición distancias DOPPLER, en servicio civil desde 1967. El sistema está operado para el Gobierno de los Estados Unidos.



Figura 44: Logo NAVSTAR.

La constelación consta de seis órbitas casi circulares con más de cuatro satélites por cada una. La altitud de los satélites es de unos 20180 km cuando están en el cenit del lugar y cada uno completa dos vueltas por cada rotación de 360° a la Tierra.

Cada satélite GPS tiene una frecuencia fundamental de 10.23 MHz, utilizada como base para transmitir. Envía información utilizando código C/A, código P y en las portadoras L1 y L2. La portadora L1 emite en una frecuencia de 1575.42 MHz y una longitud de onda de 19.05 cm; la portadora L2 utiliza la frecuencia 1227.60 MHz y una longitud de onda de 24.45 cm. El motivo de utilizar las dos frecuencias es porque permite, por comparación de sus retardos diferentes, el cálculo del retardo ionosférico. Actualmente, se ha añadido una nueva portadora, L5, con una frecuencia de 1176.45 MHz y una longitud de onda de 23.43 cm.

Sobre las portadoras L1 y L2 se envían por modulación dos códigos (C/A y P) y un mensaje. Los códigos sirven fundamentalmente para posicionamientos absolutos y son



utilizados principalmente para navegación. El código C/A ofrece precisiones nominales decamétricas. El código P ofrece precisiones nominales métricas.

En el mensaje va incluida información acerca del desfase del reloj, un modelo de retardo ionosférico y las efemérides del satélite. Las efemérides son un conjunto de parámetros que contienen, no sólo las órbitas, sino las correcciones que hay que aplicar a éstas. Son actualizadas cada hora pero son válidas para más de una hora y media.

### 2.3.2.2. GLONASS

El Sistema Orbital Mundial de Navegación por Satélite (GLONASS) de origen ruso proporciona posición y velocidad basadas en las mediciones del tiempo de tránsito y de desviación Doppler de las señales de radio frecuencia (RF) transmitidas por los satélites. El sistema está operado por Rusia y actualmente se utiliza de manera conjunta al GPS en algunos receptores comerciales. El sistema GLONASS consta de una constelación de 24 satélites (al menos 18 son necesarios para cubrir el territorio ruso) operando a una altitud de 19100 km y a una inclinación de 64.8 grados con un periodo de 11 horas y 15 minutos. Las órbitas de GLONASS han sido diseñadas para prestar un mejor servicio en las zonas más árticas del globo, donde suele ser más difícil recibir buena señal GPS.

El sistema ha tenido abandonos debido a los cambios sufridos en la antigua Unión Soviética y ha perdido ventaja en el uso civil respecto al sistema GPS. Sin embargo, el proyecto se reactivó y, actualmente, se encuentra completo, con 27 satélites en órbita (dos de ellos de reserva).



Figura 45: Logo GLONASS.

### 2.3.2.3. Galileo

El sistema Galileo, desarrollado por la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea, es un sistema de radionavegación por satélite de última generación y de alcance mundial propio, que brindará un servicio de ubicación en el espacio preciso y garantizado, bajo control civil, evitando la dependencia de los sistemas GPS y GLONASS. La precisión espacial del sistema Galileo podrá alcanzar los 30 cm sin ayuda de estaciones terrestres.



Figura 46: Logo Galileo.

Los satélites estarán situados en una órbita de media altura MEO (*Medium Earth Orbit*) a 23616 kilómetros de distancia con una inclinación de 54.7°. Actualmente, se han lanzado cuatro y se espera completar la constelación en 2015 lanzando 26 satélites adicionales. Una vez completada, la constelación Galileo estará formada por un total de 30 satélites (27 operativos y tres de reserva) situados en tres planos distintos separados 120° en longitud. Los satélites de cada plano estarán localizados a 23222 km de distancia con una

inclinación de  $56^\circ$  y un periodo orbital de 14 horas y 15 minutos. Al igual que el GPS norteamericano (un mínimo de 24 satélites en seis planos) o el GLONASS ruso (21 satélites en tres planos), Galileo ofrecerá servicios de navegación a todo el planeta mediante tres señales distintas en banda L: E1 (1575.42 MHz), E2 (1191.795 MHz) y E3 (1278.75 MHz).

#### 2.3.2.4. Beidou/Compass

Beidou, Compass o BNTS (*BeiDou/Compass Navigation Test System*) de la República Popular China cuenta con tres tipos de satélites distintos, los Beidou-G en órbita geoestacionaria (GEO), los Beidou-M en órbita de media altura (MEO) y los Beidou-I en una órbita geoestacionaria inclinada (IGSO).



Figura 47: Logo Beidou/Compass.

Cuando esté completamente operativo en 2020, el sistema Beidou estará formado por unos 35 satélites, cinco en GEO, tres en IGSO y entre 24 y 27 en MEO. Es decir, el sistema Beidou contará con un mínimo de 24 satélites en MEO, ocho en tres planos orbitales, una disposición similar al sistema GLONASS o el Galileo y distinta al GPS (seis planos con cuatro unidades). En el futuro, el sistema Beidou ofrecerá dos tipos de servicio, uno civil y otro militar, al igual que el GPS o el GLONASS.

#### 2.3.2.5. QZSS

El QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*) de Japón es un sistema de corrección de señales de navegación global por satélite o SBAS, propuesto para uso complementario del GPS en Japón. Su nombre proviene del hecho de que la mayor parte del tiempo, al menos un satélite del sistema se posicionará en torno al cenit, aumentando la resolución del sistema y permitiendo mejorar la visibilidad de la señal en ciudades con edificios altos. El primer satélite se lanzó en 2010. El QZSS estará formado por tres satélites situados en posicionamiento local en una órbita geosíncrona inclinada (IGSO, *Inclined Geosynchronous Satellite Orbit*).



Figura 48: Logo QZSS.

#### 2.3.2.6. IRNSS

El IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*) de la agencia espacial india ISRO es un sistema de navegación por satélite autónomo que estaría bajo el control total del gobierno de la India, para evitar la dependencia de otros sistemas. Se espera lanzar el primer satélite en el verano de 2013 y hay previsión de que esté operativo en 2014.



Figura 49: Logo IRNSS.

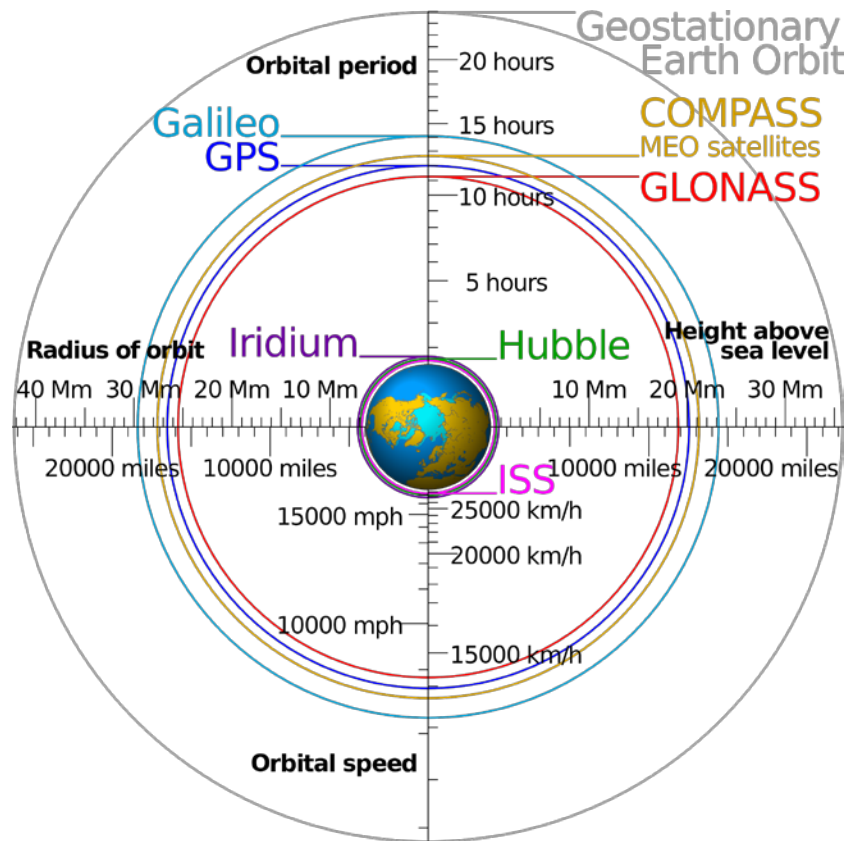


Figura 50: Comparación de las órbitas de los diferentes sistemas GNSS.

### 2.3.3. Instrumentación

El criterio que se utiliza para realizar la división de los equipos GNSS es la precisión que pueden alcanzar, así como su aplicación.

Tabla 1: Precisiones GNSS según metodología de observación.

Método	Frecuencia	Observable	Precisión	Aplicación
Absoluto	L1	Código C/A	$\pm 10$ m	Navegación
Diferencial	L1	Código C/A	1-2 m	Cartografía
Diferencial	L1	C/A y fase	1 cm $\pm$ 2 ppm	Topografía
Diferencial	L1 y L2	C/A, P y fase	5 mm $\pm$ 1 ppm	Geodesia

### 2.3.3.1. Navegadores

Sólo procesan datos de código C/A sobre la portadora L1. Los equipos para navegación son receptores GNSS muy sencillos y de bajo precio, normalmente por debajo de 200 €.



Figura 51: Navegador Garmin Montana 650t.



Figura 52; Navegador TomTom GO.

Son equipos que funcionan autónomamente, no necesitan descargar datos para conseguir la precisión menor de 10 m. Son muy sencillos de manejar, con firmware específicos para la navegación. Suelen tener accesorios para la colocación de antenas sobre barcos, automóviles o motocicletas y cartografía preinstalada como TeleAtlas (TomTom) o NavTeq (Nokia).

Actualmente, tienen una fuerte competencia en las aplicaciones incluidas en los *SmartPhones*. Su uso no suele estar relacionado con el registro de entidades cartográficas.

### 2.3.3.2. Receptores métricos

Similares a los navegadores, existe una gama de colectores GNSS destinados al registro de datos para cartografía o SIG. La precisión nominal de estos dispositivos oscila entre 2 y 5 metros, por lo que podría ser válida para cartografías con escala inferior a 1/10000 ó 1/25000. Permiten introducir correcciones diferenciales y mejorar los datos con software en post-proceso. Asimismo, se pueden integrar en otros dispositivos topográficos como estaciones totales o tener pre-instaladas versiones móviles de aplicaciones SIG.



Figura 53: Receptor métrico Leica CS25.

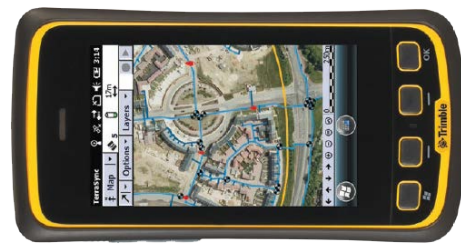


Figura 54: Receptor métrico Trimble Juno 5.

Algunos de estos “colectores de datos” pueden equipar diferentes gamas de receptores GNSS, como el modelo CS25 de Leica que puede llevar incorporada hasta una antena bifrecuencia. Su precio oscila entre 4 mil y 10 mil euros (Leica, 2013).

### 2.3.3.3. Receptores sub-métricos

Son receptores GPS/GLONASS con recepción de las mismas observables que los anteriores (L1 sólo código C/A).

Sin embargo, estos pueden trabajar diferencialmente, es decir, un equipo de referencia registrando datos continuamente y el equipo móvil tomando los puntos que se deseen registrar, ya sea de modo estático o bien cinemático.

Las precisiones que se pueden conseguir oscilan desde los 50 cm en tiempo real con correcciones a unos pocos centímetros en post-proceso, dependiendo del tipo de equipo que tome los datos y el programa asociado de post-proceso.

Las aplicaciones de estos equipos se encuadran en la cartografía y GIS a escalas entre 1/1000 y 1/5000, dependiendo de la precisión alcanzada en los puntos.

Tanto estos equipos como los anteriores incorporan las últimas tecnologías de dispositivos móviles: cámara de gran resolución, *Bluetooth*, conexión a Internet, pantalla táctil a color, etc. Su precio es inferior a 6 mil euros.



Figura 55: Receptor sub-métrico Leica Zeno 15.



Figura 56: Receptor sub-métrico Trimble Geoexplorer 6000.

### 2.3.3.4. Receptores monofrecuencia de código y fase

Estos receptores, al igual que los anteriores, toman todos sus observables de la portadora L1, pero con la diferencia que, además de tomar medidas de código C/A, también realizan medida de fase. Igualmente trabajan en modo diferencial, es decir, se necesitan dos receptores tomando medidas simultáneamente, referencia y móvil. La principal ventaja es el aumento de la precisión en el levantamiento de puntos.



Figura 57: Receptor monofrecuencia Leica GMX901.

Con estos equipos se pueden realizar posicionamientos estáticos, estático rápido, Stop&Go y cinemático. También es posible trabajar en tiempo real (RTK) con la precisión que proporciona la medida de código. Las precisiones nominales para estos equipos son  $1 \text{ cm} \pm 2 \text{ ppm}$ , lo cual permite utilizarlos para aplicaciones topográficas. Están diseñados para realizar mediciones continuas de auscultación en obras de ingeniería o arquitectura con bajo consumo de energía. Su precio es más económico que antenas bifrecuencias, aproximadamente 3 mil euros (Leica, 2013).

### 2.3.3.5. Receptores doble frecuencia

De este tipo son los equipos que consiguen mayor precisión y, por tanto, adecuados para trabajos de Topografía y Geodesia. Toman observables de ambas portadoras emitidas por los satélites, realizando medidas de Código C/A y P en L1, de Código P en L2 y medidas de fase en L1 y L2. Como se puede apreciar, estos equipos incluyen a todos los anteriores añadiendo las medidas sobre la portadora L2.

Los posicionamientos posibles con estos equipos son estático, estático rápido, Stop&Go, cinemático y KOF (*Kinematic On the Fly*) como métodos de post-proceso y además la posibilidad de realizar todos estos en tiempo real. Además pueden recibir las correcciones por medio de tecnología 3G y disponen de dispositivos con pantallas táctiles a color, donde es posible registrar gráficamente elementos cartográficos.

La principal ventaja con respecto a los equipos monofrecuencia con medida de fase es un aumento en la precisión (hasta  $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ ppm}$  en estático y  $5 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ ppm}$  en tiempo real) y, sobre todo, una enorme disminución en los tiempos de observación. Además de recibir observaciones procedentes de la constelación NAVSTAR, pueden procesar observaciones GLONASS, mejorando la precisión de las coordenadas calculadas. Últimamente, ya han aparecido receptores que igualmente pueden recibir y tratar observaciones de Beidou/Compass y Galileo.



Figura 58: Receptores Leica Viva.



Figura 59: Receptor Trimble R10.



Figura 60: Receptor Topcon Hiperpro II.

Estos receptores suelen trabajar en modo diferencial, por lo que el equipo está formado por dos antenas (fija y móvil). Dependiendo de la gama, una única antena puede tener un coste entre 9 mil y 16 mil euros. Un equipo de base y móvil tiene un precio entre 12 mil y 27 mil euros (Leica, 2013).



### 2.3.3.6. Equipos combinados

Existe la posibilidad de anexionar antenas receptoras GNSS/RTK sobre estaciones totales. De esta forma, se tiene posicionamiento absoluto con rapidez y se dispone del sistema de medición topográfica basada en ángulos y distancia. Su utilidad podría estar justificada en aquellas zonas donde no es posible medir con observaciones a satélites debido a coberturas vegetales, de edificios y otros elementos aéreos. Por otro lado, el hecho de tener una antena GNSS evita tener que realizar poligonales o redes topográficas para transferir coordenadas al punto estación, por lo que el trabajo se agiliza enormemente. Su precio aproximado es superior a 30 mil euros (Leica, 2013).



Figura 61: Leica SmartStation.

### 2.3.4. Medidas de distancia a satélites y método diferencial

#### 2.3.4.1. Medición de pseudodistancias

Mediante las señales emitidas por los satélites es posible medir las distancias entre estos y la antena del receptor. Para dar solución geométrica a la posición de la antena son necesarias tres mediciones de este tipo y ésta vendrá dada por el punto de intersección de tres esferas cuyo centro es la posición de los satélites y radio la distancia medida. La distancia desde el receptor al satélite se obtiene por medio de la medición del tiempo de propagación de la señal, que multiplicada por la velocidad de propagación da la distancia, o mejor dicho, la pseudodistancia, ya que viene afectada por múltiples errores.

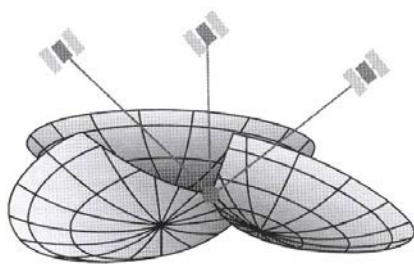


Figura 62: Posición de la antena a partir de las pseudodistancias.

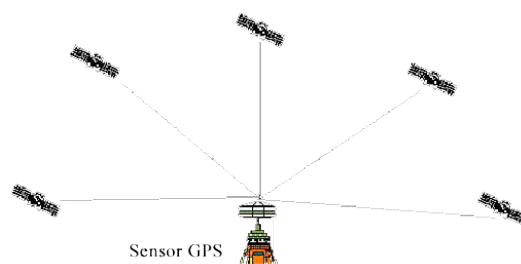


Figura 63: Buena geometría. GDOP bajo. Satélites distribuidos homogéneamente.

### 2.3.4.2. Medición de distancias con medidas de fase

Contrariamente a la medida de pseudodistancias, en la que se mide el tiempo de propagación con ayuda de los códigos modulados C/A o P, aquí se mide el desfase de la onda portadora, comparando la fase de la señal llegada del satélite con la fase de una señal de referencia generada en el receptor.

Del desfase se obtiene una parte de la distancia como parte de la longitud de onda. Pero, en principio, el número de longitudes de ondas completas en la distancia satélite-receptor, es desconocido. Por ello, el programa de cálculo tiene que estar en condiciones de determinar el número total de longitudes de onda. Este número se denomina “ambigüedades” (figura 64).

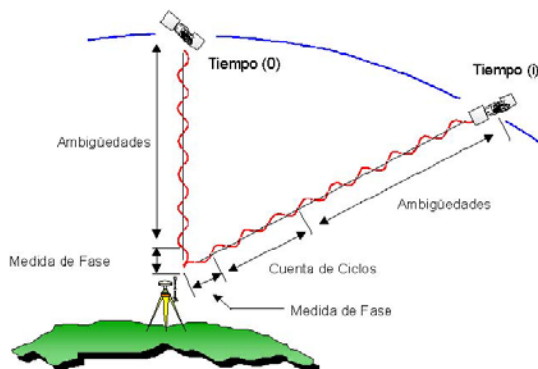


Figura 64: Concepto de ambigüedades.

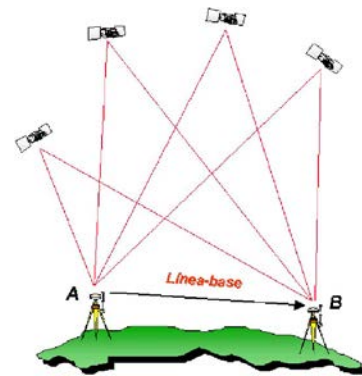


Figura 65: Concepto de línea base.

### 2.3.4.3. Método diferencial

También denominado DGPS, las señales de los satélites se reciben simultáneamente por dos receptores. El vector que une a estos dos receptores en el espacio se le denomina “línea base” (figura 65). Con este método se anulan, hasta un cierto nivel, errores inevitables obteniendo, con ello, una mayor precisión que con la determinación de un punto aislado. Se utiliza el método de medición de fase que da una mayor precisión que el de la medida de la pseudodistancia. Evidentemente, es necesario realizar el tratamiento en un ordenador de los puntos medidos en distintas estaciones.

Los errores que se minimizan e incluso eliminan utilizando el método diferencial son el retardo ionosférico y troposférico, el error en las efemérides y el error en el reloj del satélite.

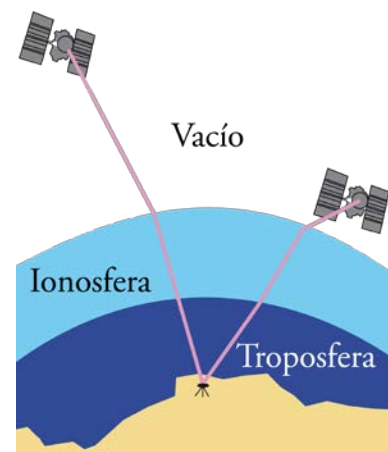


Figura 66: Capas atravesadas por la señal.



### 2.3.5. Tipos de posicionamiento

Debido a sus numerosas ventajas en materia de precisión, rapidez, polivalencia y productividad, la observación GNSS se está empleando cada vez más en Topografía. No obstante, tiene el inconveniente de que no se puede utilizar en zonas urbanas, cerca de edificios, debido al efecto multi-camino y, en general, en zonas que impidan recibir cuatro o más satélites. Siempre que se respeten determinadas reglas fundamentales, las medidas GNSS no presentan dificultades y ofrecen buenos resultados. Desde el punto de vista práctico, sin duda es más importante conocer las reglas de base relativas a la planificación, la observación y los cálculos, antes que disponer de conocimientos teóricos profundos sobre el sistema de posicionamiento global.

Existen dos tipos básicos de posicionamiento: absoluto y diferencial. Se dice que un posicionamiento es absoluto cuando se calcula de manera autónoma la posición del punto utilizando las medidas de pseudodistancia ya sea procedentes del código C/A o P. Dependiendo del código que se utilice se obtendrá una precisión que variará de 0.5 a 10 m. Se llama posicionamiento diferencial cuando están involucrados dos o más receptores GNSS, con el fin de eliminar los errores propios del sistema, calculando los incrementos de coordenadas desde el equipo de referencia al móvil. Esta variación de coordenadas vendrá dada en el sistema geocéntrico de coordenadas.

#### 2.3.5.1. Método estático

Este método consiste en estacionar dos o más receptores en los puntos en los que se desean conocer sus coordenadas, almacenando las observaciones y calculando las coordenadas en tiempo diferido. En este tipo de posicionamiento se obtienen soluciones tan redundantes como se deseen, tan solo prolongando el tiempo de observación. La desviación típica de una línea base es de  $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ ppm}$ .

Por tanto, se utiliza para distancias largas (por lo general mayores de 20 km) y cuando se requiere alta precisión, siendo más eficiente y económico que los métodos topográficos tradicionales. Es la medición clásica de líneas base, sustituyendo al método clásico de triangulación. Sus aplicaciones se encuentran en el control geodésico, observación de redes nacionales e internacionales, control de movimientos tectónicos y control de deformaciones en diques y estructuras.

Existe una variante “rápida” para líneas base no superiores a 20 km y cuyo tiempo de observación dependerá de factores como la longitud de la línea base, número de satélites, GDOP o ionosfera. Consiste en estacionar en la estación de referencia temporal, observando y almacenando datos de todos los satélites continuamente, mientras que el receptor móvil se estaciona en el punto que se pretende levantar. Siguiendo los tiempos de observación recomendados se obtienen precisiones de  $5 \text{ a } 10 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ . Las aplicaciones serían adecuadas en la densificación de levantamientos de control sustituyendo al método

clásico de poligonación o en la determinación de puntos de control en ingeniería civil como bases de replanteo.

Tabla 2: Tiempos de observación en el método estático según longitud de la línea base.

	Nº de satélites (GDOP $\leq$ 8)	Longitud de la línea base	Tiempo de observación de día	Tiempo de observación de noche
Estático rápido	4 ó 5	Menos de 5 km	De 5 a 10 min.	5 min.
	4 ó 5	De 5 a 10 km	De 10 a 20 min.	De 5 a 10 min.
	4 ó 5	De 10 a 15 km	Alrededor de 30 min.	De 5 a 20 min.
Estático	4 ó 5	De 15 a 30 km	De 1 a 2 horas	1 hora
	4 ó 5	Más de 30 km	De 2 a 3 horas	2 horas

### 2.3.5.2. Método cinemático

La segunda forma de medir se denomina cinemática, debido al movimiento de uno de los receptores. En este caso, uno de los receptores denominado “referencia” se queda siempre en posicionamiento estático grabando observaciones y el otro receptor se irá movimiento entre los puntos a medir por lo que se denomina “móvil”. De esta forma, el receptor móvil se podrá mover acoplado a un bastón transportado por un usuario a pie o en algún tipo de transporte como un vehículo, embarcación, avión, etc.

El receptor móvil puede ir realizando mediciones en intervalos previamente seleccionados, por ejemplo, 1, 2, 5 ó 10 segundos. La precisión con la que se determina la línea base oscila entre 1 y 3 cm  $\pm$  1 ppm en planimetría y entre 2 y 3 cm  $\pm$  1 ppm en altimetría.

Las aplicaciones de este tipo de posicionamiento estarían en la determinación de la trayectoria de objetos en movimiento, levantamientos topográficos en general, medición de ejes de carreteras y ferrocarriles así como sus perfiles transversales o levantamientos hidrográficos y batimetría. Las principales ventajas son su rapidez y economía. Sin embargo, debe mantener un contacto constante con los satélites y debe cuidarse el valor del GDOP para poder garantizar una precisión adecuada en cada punto medido.

En el nacimiento de este tipo de posicionamiento surgieron varias formas de trabajar (cinemático, Stop&Go) que requerían que se estacionara inicialmente el receptor móvil en un punto de coordenadas conocidas durante un tiempo mínimo. Posteriormente, apareció el posicionamiento KOF (*Kinematic On the Fly*) para equipos bifrecuencia, en el que no era necesario partir de un punto de coordenadas conocidas sino que se comenzaba directamente en movimiento y después de 10 segundos se resolvían las ambigüedades y se utilizaban éstas para transmitir las a los puntos medidos previamente.

Sin embargo, la verdadera revolución en la medición GNSS con fines topográficos fue la llegada del posicionamiento RTK (*Real Time Kinematics*). El planteamiento en

campo es el mismo, donde un receptor hará de referencia desde un punto de coordenadas conocidas y el otro receptor se irá desplazando por los puntos a ser medidos. La diferencia estriba en que existe comunicación permanente entre ambos receptores vía radio o GPRS, de tal manera que el receptor referencia está constantemente enviando datos al receptor móvil por lo que se pueden calcular sus coordenadas precisas en tiempo real. La precisión alcanzada es de  $1 \text{ ó } 2 \text{ cm} \pm 1 \text{ ppm}$  y un alcance de hasta 30 km utilizando del radio-modem o superior si se utiliza GPRS. Además, es posible trabajar en el mismo área simultáneamente y de forma independiente diferentes equipos móviles, apoyándose sobre la misma referencia.

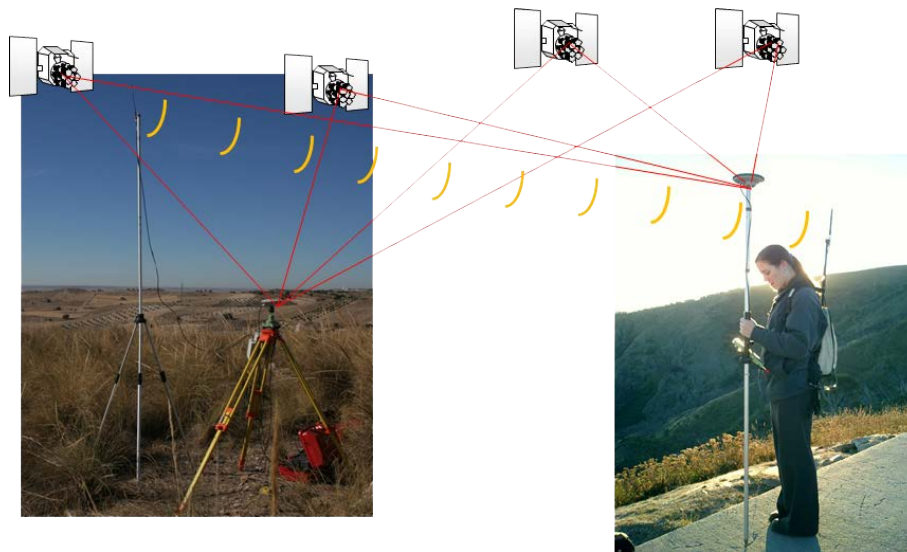


Figura 67: Observación GNSS RTK.

Por tanto, se dispone de un método muy rápido de obtención de coordenadas. La precisión alcanzada permite su uso en trabajos de ingeniería, por ejemplo, replanteos o levantamientos para cartografía a gran escala, como puede ser la necesaria para la documentación de emplazamientos de interés patrimonial. Si el receptor referencia está ubicado en un lugar seguro, sólo es necesario un operario para realizar la medición, abaratando aún más los costes. Por si esto no fuera suficiente, gracias a la inversión de diferentes organismos públicos y privados, en los países desarrollados existe una red lo suficientemente densa de estaciones fijas de referencia emitiendo en RTK que pueden ser utilizadas por los usuarios para sus mediciones GNSS, por lo que apenas es necesario un único receptor que actuaría de móvil. Cabe decir que estas estaciones también pueden ser utilizadas para posicionamientos estáticos.

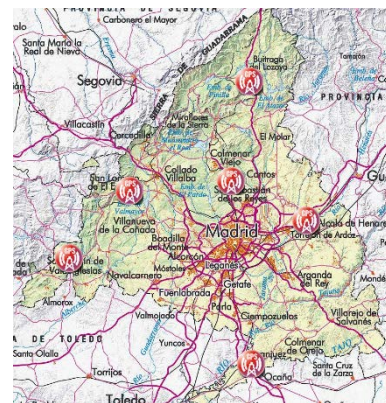


Figura 68: Red de estaciones de referencia GNSS de la Comunidad de Madrid (Comunidad de Madrid, 2013).

Tabla 3: Comparación de precisiones entre las técnicas GPS cinemáticas.

Tipo de observación	Orden de precisión (en m)	Tiempo Real o Post-Proceso
Pseudo-distancia	10	PP
Pseudo-distancia diferencial	1	PP
WAAS pseudo-distancia	1	TR
Corrección diferencial basada en satélites	0.1	TR
PPP ( <i>Precise Point Positioning</i> )	0.1	PP
RTK	0.01	TR
VRS ( <i>Virtual Reference System</i> )	0.01	TR
Diferencial con línea base	0.01	Ambos
Diferencial con red de estaciones	0.01	Ambos

### 2.3.5.3. Metodología de observación

La observación GNSS es un método diferencial, donde se observa y se calcula una línea base entre dos receptores. Cuando ambos receptores observan al mismo conjunto de satélites, simultáneamente, la mayoría de los efectos atmosféricos se cancelan. Cuanto más corta sea la línea base, más se verificará esto, pues la atmósfera que atraviesan las señales recibidas por los receptores respectivos tenderá a ser idéntica.

Por tanto, dependiendo del área y del número de puntos a observar, hay que considerar la posibilidad de establecer estaciones de referencia temporales desde las cuales se radien puntos.

Si la geometría de la constelación es inadecuada, o si las turbulencias ionosféricas son significativas, puede ocurrir que el software de post-proceso no resuelva ambigüedades, o si las resuelve, que los resultados rebasen las especificaciones de precisión establecidas a las que se ajustarían los resultados en condiciones favorables. Los lugares para las estaciones han de ser elegidos en orden a que se ajusten a observaciones GNSS. Un buen emplazamiento debe cumplir las siguientes características:

- No deben existir obstrucciones por encima de 15° sobre el horizonte.
- No deben haber en los alrededores superficies que puedan reflejar y producir efectos multi-camino.
- Deben estar alejadas de lugares de tránsito. Si es necesario, se debería poder dejar el receptor sólo y desatendido.
- No deben encontrarse en los alrededores emisores de radiofrecuencias potentes como antenas TV, radio, etc.

Tabla 4: Modelado de los errores GNSS.

Fuente error	Error típico	Corrección
Órbita satélites	20 m	Diferencial
Reloj satélites	10 m	Diferencial
Retardo ionosférico	50 m	Diferencial + doble frecuencia
Retardo troposférico	2.3 m	Modelo + Diferencial
Multi-camino	10 m	Situación antena
Reloj receptor	10 m	Post-proceso
Ruido	mm portadora	Código

## 2.4. Técnicas fotogramétricas

La fotogrametría es el arte, ciencia y tecnología de obtener información fiel acerca de objetos físicos y su entorno a través de procesos de grabación, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos (ASPRS, 2004).

La fotogrametría permite la reconstrucción de la posición, orientación, forma y tamaño de objetos a partir de imágenes (Kraus, 2007). Estas imágenes se podrán producir mediante fotografía convencional o mediante fotogrametría digital, desde satélite, vehículos aéreos o terrestres en movimiento, en estático sobre objetos a distancia cercana e incluso bajo el agua. Los resultados de un análisis fotogramétrico podrán ser coordenadas del objeto en un sistema tridimensional, mapas con los detalles planimétricos y curvas de nivel altimétricas, modelos geométricos (digitales), ortofotos rectificadas e incluso fotomodelos tridimensionales con las texturas extraídas de las fotografías originales.

Se denomina fotogrametría digital a aquella que utiliza imágenes digitales del objeto para su reconstrucción, realizando todo el proceso de visión mediante ordenadores. Esta parte de la fotogrametría ha sustituido a la fotogrametría analógica que utilizaba fotografías convencionales mediante instrumentos óptico-mecánicos y a la fotogrametría analítica que utilizaba igualmente fotografías convencionales mediante el empleo de ordenadores. La fotogrametría digital surgió a finales del siglo XX y ha tenido un rápido avance gracias a la electrónica: software, ordenadores cada vez más potentes y escáneres digitalizadores primero y cámaras digitales (métricas y aéreas) después.

La fotogrametría permite la reconstrucción de un objeto y el análisis de sus características sin contacto físico, basándose en el solape entre fotografías tomadas desde puntos de vista diferentes. Hoy en día, este tipo de adquisición de información de la superficie de la Tierra se denomina teledetección. La teledetección abarca todos los métodos de adquisición de la información de la superficie de la Tierra mediante la medida e interpretación de energía electromagnética reflejada o emitida por el objeto. Aunque la teledetección incluye la parte de la fotogrametría que registra la superficie de la Tierra, cuando el interés principal son sus características geométricas, se habla de fotogrametría y no de teledetección (Kraus, 2007).

Se podrían considerar dos ámbitos de aplicación. La fotogrametría métrica, centrada en obtener la información métrica tridimensional del objeto. Y la fotogrametría interpretativa o fotointerpretación, dedicada a identificar y clasificar objetos.

Como se comentó en la introducción de este capítulo, las técnicas fotogramétricas se pueden clasificar como métodos indirectos (no miden directamente la distancia) y pasivos (no emiten radiación alguna). Recogen la energía electromagnética en un soporte (físico o digital) con diversas configuraciones. En función de éstas, se recoge información en distintas bandas del espectro electromagnético.

La mayoría de los sensores fotogramétricos detectan la luz visible porque es una radiación ambiental fácilmente disponible, aunque también se puede utilizar el infrarrojo.

Su precisión depende mayoritariamente de la resolución de las imágenes y de la densidad de elementos identificables en ellas.

Las principales aplicaciones de la fotogrametría se han centrado en la producción de cartografía, ya sea mediante mapas vectoriales o mediante ortofotografías. De hecho, un altísimo porcentaje de la cartografía existente en un país procede de una restitución fotogramétrica. El conjunto de hardware y software que permite gestionar las imágenes digitales del objeto se denominada estación de fotogrametría digital. Básicamente, las estaciones de fotogrametría digital son realmente digitalizadores tridimensionales que permiten tratar las imágenes permitiendo visualizar el objeto en 3D y registrar puntos para formar el modelo.

En función de la altura (o distancia al objeto) a la que se encuentre la cámara, se puede dividir la fotogrametría en dos variantes, aérea y de objeto cercano. La fotogrametría aérea está basada en la toma de imágenes desde el aire a una altura considerable (superior a 300 m). Su objetivo es el modelado de la superficie de la Tierra que, probablemente, servirá como base cartográfica en proyectos más amplios (SIG, proyectos de ingeniería o ambientales, riesgos naturales, etc.). Por el contrario, la fotogrametría de objeto cercano o terrestre utiliza imágenes tomadas a una corta distancia, a partir de una cámara en tierra (montada en trípode, por ejemplo) o desde dispositivos aéreos de baja altura de vuelo (por ejemplo, UAV). Tiene como objeto, fundamentalmente, el registro de fachadas de edificios, el control dimensional de obras de ingeniería y arquitectura, la documentación para la conservación de patrimonio, el modelado de obras artísticas o piezas de ingeniería, reconstrucción de accidentes, arqueología, etc.

Si las fotografías han sido realizadas utilizando cámaras métricas, el proceso de modelado es relativamente simple. Sin embargo, hoy en día, existen potentes aplicaciones que utilizan algoritmos para adaptar las fotografías realizadas con cámaras convencionales no métricas, extendiendo el uso de la fotogrametría hacia otros sectores.

Con una historia de 150 años, la fotogrametría es una tecnología completamente madura donde se han desarrollado muchos procesos automáticos para facilitar la extracción de información a partir de imágenes, revolucionando la cartografía. A pesar de la complejidad geométrica de todos sus algoritmos, hoy en día, puede ser utilizada por un usuario inexperto, existiendo aplicaciones específicas diseñadas para gestión de recursos, protección civil, arquitectura o modeladores, que poco tienen que ver con la cartografía tradicional. A esto habría que añadir la sucesiva bajada de precios de todos los componentes (desde el material de campo al de gabinete), así como la mejora en el rendimiento de las aplicaciones (gracias, sobre todo, al avance de la informática), permitiendo que la fotogrametría sea una interesante opción en cualquier proyecto que necesite el registro tridimensional de un objeto de forma precisa.



### 2.4.1. Fotogrametría aérea

La fotogrametría aérea utiliza imágenes tomadas desde cámaras métricas de gran o medio formato transportadas en aviones. Las imágenes están tomadas con la cámara colocada lo más perpendicularmente posible al objeto, permitiendo un pequeño margen en el alabeo y cabeceo del avión. Para poder registrar tridimensionalmente los elementos fotografiados, estas imágenes deben tener un solape entre ellas de, al menos, el 60% y se deben conocer ciertos parámetros que identifican estas imágenes, como son las características métricas de la cámara y la posición (coordenadas y ángulos de giro) de la cámara en el momento de la toma. Por otro lado, cada día se están utilizando más las imágenes tomadas de forma oblicua.

Se puede realizar el registro tridimensional de dos formas: por medio de restitución fotogramétrica, de manera asistida por un operador que mediante visión estereoscópica dibuja los elementos (tanto planimétricos como altimétricos) que en las imágenes aparecen; o por medio de correlación fotogramétrica donde, mediante un algoritmo de comparación de imágenes, se calculan puntos tridimensionalmente de manera no asistida.

Ambas operaciones, y otras necesarias en el proceso fotogramétrico, se llevan a cabo utilizando estaciones fotogramétricas digitales que son la combinación de hardware, de visión y movimiento especiales, y software apropiado instalados sobre un ordenador. El fundamento de estas estaciones es la reconstrucción de la geometría de la toma mediante operaciones matemáticas y suelen requerir un alto nivel de especialización en el usuario. Para ello, es necesario que las imágenes tengan un formato digital. Esto se consigue directamente con modernas cámaras digitales pero todavía existen cámaras métricas analógicas (por ejemplo, Leica RC30), con buena geometría y resolución, que generan imágenes en soporte tangible. Por otro lado, también existe un gran archivo de imágenes analógicas que podrían ser interesantes para determinados proyectos. Por tanto, es necesario digitalizar estas imágenes por medio de escáneres fotogramétricos de alta precisión (por ejemplo, Leica DSW700).



Figura 69: Imagen aérea analógica de 9”.

Hoy en día, prácticamente sólo se utilizan estaciones de fotogrametría digital, siendo muy escasa la utilización de equipos analógicos. De la misma manera ocurre con las cámaras aéreas digitales respecto de las cámaras analógicas. Este hecho provoca que los escáneres digitales para la digitalización de imágenes analógicas hayan perdido protagonismo en el proceso fotogramétrico. Este avance de las cámaras digitales se debe, fundamentalmente, a la mejora de su electrónica con mayores resoluciones y velocidad de captura, pero también a la implementación de componentes externos como los sistemas de posicionamiento GNSS/INS. Además, gracias al formato digital de toda la información, es posible automatizar casi todas las tareas que se llevan a cabo en el proceso fotogramétrico. De esta forma, se mejora el rendimiento y se abaratan los costes, permitiendo el acceso a usuarios menos experimentados.



Por último, los productos generados mejoran en calidad cuantitativa y cualitativa, ya que es posible generar cartografía vectorial de alta calidad, modelos digitales más densos y precisos, mejores ortofotografías y soluciones virtuales con la combinación de estos dos últimos.

#### 2.4.1.1. Proceso fotogramétrico

##### a) Vuelo fotogramétrico

Dependiendo del país, la toma de imágenes aéreas puede ser realizada por empresas públicas o privadas. Es necesaria una planificación previa del vuelo que permita capturar toda la información necesaria a la precisión requerida. El objetivo es que todo el área de trabajo quede cubierta estereoscópicamente, es decir, por al menos dos fotografías, lo cual permitirá registrar posteriormente en 3D.

Para esta planificación es fundamental conocer la escala de la cartografía a generar (que condicionará la precisión necesaria), la forma y dimensiones de la zona de actuación, las características de la cámara utilizada, las características de la zona (relieve, urbano o rústico), las condiciones meteorológicas (presencia de nubes, época del año, posición del Sol) o el objetivo de la cartografía (que condicionará el tipo de elementos a registrar).

La precisión necesaria y la resolución de la cámara condicionarán la altura de vuelo. La relación entre el tamaño del píxel en coordenadas terreno (GSD) y el tamaño del píxel en la imagen es la escala de la fotografía. Esta escala también será la relación entre la altura de vuelo y la focal de la lente utilizada, de la forma:

$$E_{vuelo} = \frac{\text{focal}}{\text{altura de vuelo}}$$

Para facilitar la labor, las cámaras digitales permiten intercambiar entre varias focales. Además estas cámaras, como se explica en el apartado 2.4.1.2, permiten el registro simultáneo de imágenes pancromáticas (blanco y negro) y multiespectrales (básicamente, en color e infrarrojo).

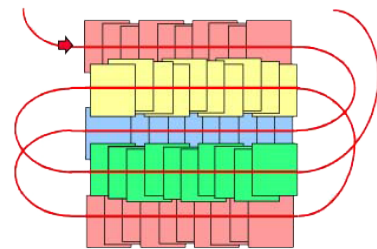


Figura 70: Gráfico de vuelo.

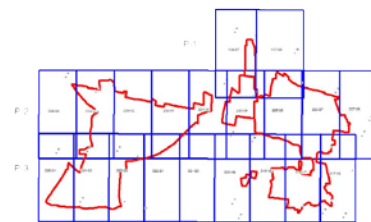


Figura 71: Gráfico de distribución de modelos estereoscópicos.

## b) Georreferenciación de las imágenes

Antes de comenzar la fase de georreferenciación de las imágenes, éstas deben pasar un procesamiento previo que corrija posibles errores originados en el momento de la toma, como puede ser la presencia de nubes, sombras, falta de nitidez, etc. Para ello se utilizan filtros, ajustes de color, ajustes de brillo y contraste, corrección de los histogramas, etc. El proceso es automático aunque necesita supervisión de los resultados, pues la precisión de la medida dependerá de la calidad de las imágenes.

En los proyectos de fotogrametría aérea se utilizan cámaras métricas por lo que se conocen los parámetros de orientación interna, fundamentales para llevar a cabo el proceso de georreferenciación. Estos parámetros son la distancia focal, la posición del punto principal y parámetros de distorsión (radial y tangencial), conocidos a partir del proceso previo de calibración.

La documentación generada por un vuelo fotogramétrico está básicamente formada por las imágenes registradas. Cuando se utiliza una cámara aérea digital, normalmente está integrada en el avión en un sistema que incluye una unidad de posicionamiento GNSS/INS. Esta unidad generará las posiciones XYZ en el sistema WGS84 y los ángulos de giro ( $\omega$ ,  $\gamma$ ,  $\kappa$ ) en el momento de la toma de cada imagen. Es decir, además de las imágenes, se incluye la georreferenciación u orientaciones externas de estas.

Sin embargo, estas orientaciones no suelen considerarse finales y se suelen ajustar o refinar para eliminar posibles errores sistemáticos. Este proceso de ajuste se denomina Aerotriangulación y mejorará las orientaciones obtenidas *on-the-fly* (OTF) buscando conservar las relaciones existentes entre fotogramas con solape. En el proceso de ajuste se utilizan como parámetros conocidos ciertas medidas realizadas sobre las imágenes además de las coordenadas terreno de puntos de control y como incógnitas se consideran los parámetros de orientación de las imágenes. Por otra parte, también se podrían incluir los parámetros de orientación interna, en un proceso denominado auto-calibración. Todo ello se calcula mediante el principio de colinealidad y utilizando el ajuste por mínimos cuadrados (MM.CC.) lo que permite localizar errores y extraer desviaciones típicas que permiten evaluar la precisión alcanzada en el vuelo. Esta precisión en las orientaciones influirá directamente en la calidad de la información digitalizada posteriormente, por lo que es de suma importancia. Tanto el manejo de las aplicaciones de aerotriangulación como la interpretación de los resultados obtenidos necesitan experiencia por parte del usuario.

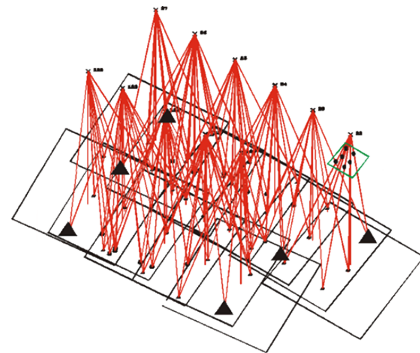


Figura 72: Ajuste de un bloque fotogramétrico.

En determinadas ocasiones, se puede mejorar la aerotriangulación con la medición de puntos de apoyo tomados en campo por medio de alguna técnica topográfica o geodésica, es decir, por ejemplo mediante un receptor GNSS. Estos puntos de apoyo deben haber sido registrados previamente en las imágenes. La cantidad y distribución de estos puntos depende de la configuración del vuelo: cantidad de pasadas, recubrimientos, existencia de

pasadas transversales, etc. Además, si no se dispone de un sistema de posicionamiento GNSS/INS en el avión, esta necesidad de puntos de apoyo es imprescindible para el proceso de georreferenciación.

### c) Registro de la información

Una vez que los fotogramas están orientados, se puede registrar de forma digital y tridimensionalmente la información que contienen. El registro puede ser realizado de dos formas, no excluyentes: restitución fotogramétrica y correlación automática. Ambas se basan en el principio de colinealidad para obtener datos tridimensionales a partir de dos imágenes bidimensionales con solape entre ellas.

Por un lado, se podría realizar el registro tridimensional de entidades mediante un sistema de visión que permitiera ver estereoscopia entre dos imágenes con solape. Estas dos imágenes con solape se denominan “par estereoscópico”. El proceso de registro se denomina “restitución fotogramétrica” y consiste en grabar las posiciones de un índice que se puede mover tridimensionalmente sobre la imagen estereoscópica de tal manera que siempre esté apoyado sobre el objeto que se está registrando. Tanto la visión estereoscópica como el movimiento tridimensional del índice requieren de hardware específico que incorporan las estaciones de fotogrametría digital, como se indica en el apartado 2.4.1.3.

El proceso de restitución permite registrar entidades que definen el relieve, por ejemplo, las curvas de nivel, lo que tradicionalmente se conoce como el registro de la altimetría. Estas curvas de nivel no existen en el terreno y son líneas imaginarias a una cota fija definida por el pliego de prescripciones cartográficas. También permite el registro del resto de entidades que sí se visualizan en las fotografías, como pueden ser vías de comunicación, edificaciones, hidrografía, vegetación, etc. Este conjunto de elementos se suele denominar, genéricamente, planimetría.



Figura 73: Estación de fotogrametría Digi3D.

La restitución fotogramétrica no está exenta de dificultades. De hecho, se necesita un entrenamiento especializado por parte del usuario para registrar correctamente. La dificultad reside en varios aspectos: interpretación de las imágenes, visión estereoscópica, posado del índice, movimiento del índice, registro adecuado de entidades, etc. En la división que se ha realizado de altimetría y planimetría, sin duda la altimetría es la que genera mayor dificultad de registro puesto que se debe registrar una entidad, llevando de manera continua el índice posado sobre el terreno a una determinada cota. El resultado de la restitución fotogramétrica es un archivo vectorial en algún formato de CAD con las entidades registradas, por lo que se podrán utilizar para generar cartografía de la zona.

El segundo método de registro de información es utilizando la correlación automática. Este proceso matemático consiste en comparar dos fotogramas con solape

calculando las coordenadas tridimensionales de un punto a partir de la posición que ocupa su imagen (píxel) en ambos fotogramas. El proceso es automático y apenas requiere indicar la densidad de puntos que se quieren calcular. El resultado, por tanto, es una nube de puntos, es decir, no existen elementos lineales (planimetría). Como todo automatismo, necesita la supervisión por parte del usuario para detectar anomalías o errores generados. Los errores suelen ser producto de puntos mal medidos en zonas con sombras, poco contrastadas u homogéneas. Además, los puntos así determinados no siempre estarán sobre el suelo, pudiendo estar sobre árboles, edificios u otros objetos no deseados. Por tanto, precisa de una edición posterior para corregir estos casos.

Se puede mejorar el cálculo de la correlación si se introducen líneas estructurales definitorias del relieve, como pueden ser la hidrografía o vías de comunicación. Estas líneas deberán restituirse previamente. Por tanto, se puede utilizar un proceso combinado entre restitución y correlación para obtener un conjunto de datos más preciso. Con el resultado de la correlación se puede calcular un modelo digital del terreno de la zona que se podrá utilizar en posteriores cálculos como la generación de curvas de nivel o el cálculo de la ortofoto. Aunque existen ciertos algoritmos para la extracción automática de las líneas estructurales que definen un MDT, no se podrá generar cartografía ya que no se registran elementos planimétricos necesarios en todo mapa como edificios, vegetación, etc.

Hoy en día, se han desarrollado algoritmos de fotogrametría multi-rayo. Esta técnica aprovecha todas las imágenes realizadas por las cámaras digitales para calcular, mediante correlación automática, las coordenadas tridimensionales de los puntos. En un vuelo con un recubrimiento longitudinal de 80% y transversal de 60% se pueden conseguir hasta 12 rayos por cada punto. De esta forma, se evitan las ocultaciones debido al abatimiento producido por los objetos en una perspectiva cónica. El cálculo se realiza mediante ajuste por MM.CC. confiriendo robustez y automatismo al proceso. Con cámaras de gran formato y alta resolución, el resultado es un modelo digital de superficies (MDS) de alta densidad con más de 100 puntos/m<sup>2</sup> y con una precisión superior a 10 cm. Consecuentemente, se pueden conseguir ortofotos verdaderas de alta calidad. Además, al igual que ocurre con los algoritmos de clasificación de puntos LiDAR que posteriormente se analizarán, se pueden clasificar los objetos que aparezcan en el MDS obtenido mediante fotogrametría multi-rayo, teniendo la ventaja de que se pueden utilizar técnicas estereoscópicas para fotointerpretación de los datos, facilitando la tarea al usuario.



Figura 74: Imágenes tomadas de un edificio desde diferentes puntos de vista para evitar ocultaciones mediante Vexcel UltraCam (Vexcel, 2013).

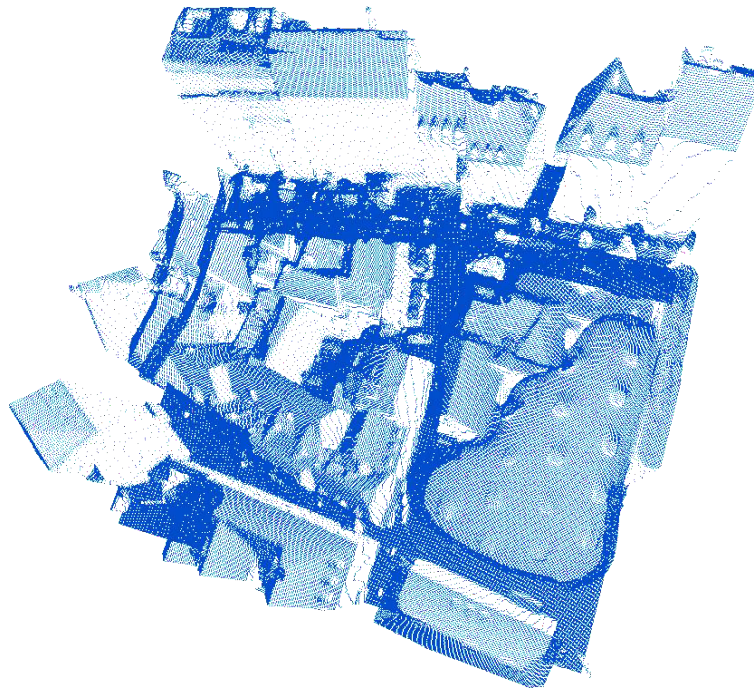


Figura 75: Nube de puntos generada por Vexcel UltraMap a partir de imágenes tomadas con UltraCam (Vexcel, 2013).

#### 2.4.1.2. Cámaras aéreas

El instrumento fundamental de registro de la información en fotogrametría aérea son las cámaras. De sus características dependerán el tipo y grado de precisión de los datos extraídos. Como se ha mencionado en la introducción, hoy en día, prácticamente sólo se utilizan cámaras digitales, en sus diferentes formatos. Estas cámaras son métricas, lo que significa que se conoce perfectamente su configuración interna que viene definida por la focal, la posición del punto principal y las distorsiones. De hecho, estos valores deben ser proporcionados por la compañía constructora de la cámara y se deben verificar periódicamente mediante un proceso de calibración. El objetivo de este control es ofrecer la máxima garantía en la calidad geométrica de las imágenes registradas.

Las primeras cámaras métricas digitales aéreas se presentaron en el congreso ISPRS del año 2000 en Ámsterdam, después de una década de desarrollo en busca de un diseño que permitiera el registro de la mayor cantidad de píxeles posibles en menor tiempo posible. Z/I Imaging (hoy Intergraph) y LH (hoy Leica Geosystems) fueron las dos empresas responsables de esta innovación. De hecho, estas dos grandes empresas (curiosamente, hoy en día, juntas en el mismo grupo) abanderaron dos propuestas diferentes para el registro.

Por un lado, Leica propuso el registro utilizando un CCD lineal, formándose la imagen mediante la unión de las diferentes líneas que el sensor va registrando gracias al movimiento del avión. Por ello, también son denominadas de barrido. Al ser un registro de una única línea de píxeles, la imagen no está afectada del movimiento del avión pero es preciso resolver la georreferenciación de cada una de las líneas para poderse unir en una



única imagen. Además, supone tener varios sensores registrando con ángulos de incidencia diferentes para tener imágenes desde diferentes puntos de vista y generar estereoscopía.

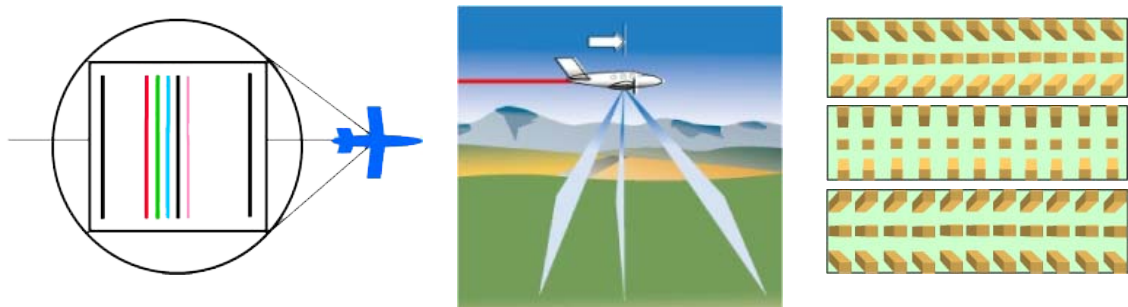


Figura 76: Formación de imágenes con sensores CCD lineales.

En contraposición a esta idea, Intergraph ofrecía la posibilidad de registrar mediante un CCD de área registrando una zona en un solo disparo. Sin embargo, para ampliar el tamaño de la zona registrada se utilizan varios sensores (normalmente, cuatro) por lo que la imagen final es la composición de todos ellos. Estas cámaras están afectadas del movimiento del avión debido a la velocidad de cada sensor y a que cada sensor está registrando los píxeles en planos focales diferentes, que deben ser rectificadas para llevarlos a uno único.

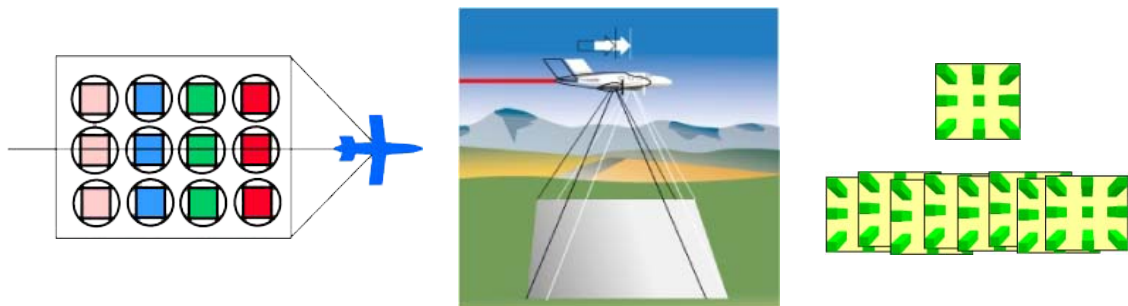


Figura 77: Formación de imágenes con sensores CCD de área.

Actualmente, existe casi una decena de compañías que fabrican cámaras digitales aéreas que, de una manera u otra, han seguido los desarrollos comenzados por Leica y ZI.

En función del tamaño de la imagen registrada, se puede diferenciar entre cámaras aéreas de medio formato y cámaras aéreas de gran formato. Estas últimas registran extensas zonas del terreno en una sola toma, pero su precio es mucho más elevado. En la figura 78 se muestra la comparación de la zona registrada por cámaras de diferentes resoluciones.

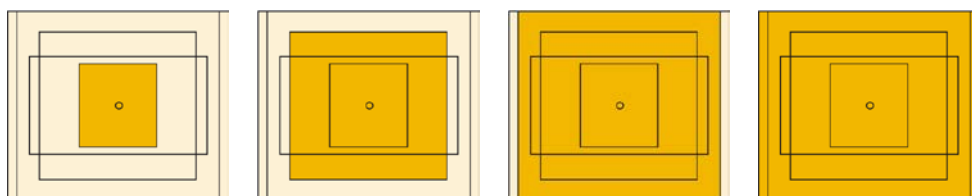


Figura 78: Tamaños de imagen de la cámara de medio formato antigua Intergraph RMK-D (izquierda), y de las cámaras de gran formato Intergraph DMC-II modelos 140, 230 y 250, respectivamente.

Una de las posibilidades más extendidas de las cámaras de medio formato es su inclusión de forma rígida en sistemas LiDAR, como se mencionará en el apartado 3.3. Además, gracias a su tamaño y peso, se pueden incorporar en pequeños sistemas UAV.



Figura 79: Leica RCD30 montada en UAV de SwissDrones.

Para garantizar la verticalidad de la toma, tanto unas cámaras como las otras pueden llevar incorporadas plataformas giroestabilizadoras que compensan posibles movimientos angulares del avión. Estas plataformas también pueden utilizarse en sistemas LiDAR. Un ejemplo de estas plataformas es el modelo PAV80 de Leica, que tiene un precio aproximado de 88 mil euros (Leica, 2013).

A continuación, se exponen algunos modelos de cámaras, habitualmente empleados, diferenciando entre medio formato y gran formato.

#### a) Cámaras aéreas de medio formato

Trimble ofrece varios modelos de cámara de medio formato basados en las Applanix DSS (439, 460 y 500). Cada una de ellas ofrece imágenes de 39, 60 y 80 megapíxeles en color e infrarrojo. Además, los modelos 439 y 500 tienen la posibilidad de procesar en modo dual (Trimble, 2013).



Figura 80: Trimble DSS 500.

Por otro lado y debido a la adquisición de la compañía Rollei Metric en 2008, Trimble ofrece el modelo Aerial Camera basado en las cámaras de medio formato Rollei de 60 y 80 megapíxeles y tamaño de píxel de 6 y 5.2  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Ambas familias de modelos llevan compensación FMC.



Figura 81: Trimble Aerial Camera.

Optech ofrece el modelo CS-10000 con una resolución de 80 megapíxeles RGB y un tamaño de píxel de 5.2  $\mu\text{m}$ . Pesa 6 kg. Tiene un sistema para compensar el movimiento del avión (FMC). El controlador permite incorporar dos cámaras trabajando en modo dual (Optech, 2013).



Figura 82: Optech CS-10000.

Leica ofrece la cámara de medio formato RCD30, que registra imágenes multispectrales en cuatro bandas y en el infrarrojo. Se puede acoplar a los sensores LiDAR ALS de Leica. Produce imágenes

de 60 megapíxeles y un tamaño de píxel de 6  $\mu\text{m}$ . Dispone de compensación de movimiento del avión (FMC) en dos ejes. Gracias a su peso de 6 kg, puede montarse sobre UAV. Su precio aproximado es de 345 mil euros (Leica, 2013).



Figura 83: Leica RCD30.

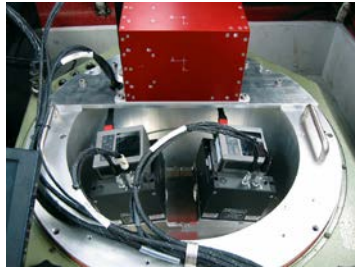


Figura 84: IGI DigiCAM dual en oblicuo.



Figura 85: IGI DigiCam Quattro.

IGI ha desarrollado una cámara de medio formato que puede funcionar de manera individual o en montaje de dos, tres cuatro o cinco cámaras, cubriendo un amplio espectro de proyectos fotogramétricos. Según las lentes que se monten, podrá registrar en RGB e infrarrojo de forma simultánea, con un tamaño de píxel de 6  $\mu\text{m}$ . La cámara tiene 60 megapíxeles, por lo que se podrá realizar un montaje para registrar imágenes de 118, 172 ó 235 megapíxeles. En tales combinaciones, se obtienen imágenes de gran formato. Además, se pueden montar dos o cuatro cámaras en oblicuo para el modelado 3D de zonas urbanas. Si se elige el montaje Penta, cuatro está montadas en oblicuo y una en el nadir. Las combinaciones también pueden realizarse utilizando la cámara termal de IGI, DigiTHERM (IGI, 2013).

#### b) Cámaras aéreas de gran formato

Intergraph ha desarrollado la familia de cámaras digitales DMC-II de gran formato. Disponen de un sensor de área pancromático y cuatro multispectrales. Tiene tres configuraciones diferentes en función del tipo de trabajo y precisión requerida. El modelo DMC-II 140 tiene una resolución de 140 megapíxeles en pancromático y un tamaño de píxel de 7.2  $\mu\text{m}$ , permitiendo registrar un GSD entre 50 y 80 cm. Los modelos DMC-II 230 y DMC-II 250 ofrecen una resolución de imagen 230 megapíxeles y 250 megapíxeles, respectivamente, y un tamaño de píxel de 5.6  $\mu\text{m}$ . Permiten registrar un GSD entre 3 y 60 cm. Están destinadas al registro de grandes proyectos de fotogrametría. Se pueden actualizar de un modelo a otro. Intergraph ha sido recientemente adquirida por el grupo Hexagon al cual también pertenece Leica. Por tanto, el grupo sueco ofrece dos cámaras de gran formato con construcción completamente diferente: La DMC basada en sensores CCD de área y la ADS basada en sensores CCD de línea (Leica, 2013).



Figura 86: Cámara aérea Intergraph DMC-II.



Leica ofrece la tercera generación de la cámara suiza de gran formato basada en sensores lineales (o de barrido) pancromáticos, color e infrarrojo. No utiliza *pan-sharpening*, siendo las imágenes pancromáticas, color e infrarrojo de la misma resolución. Se ha incrementado la sensibilidad a la luz cuatro veces respecto de modelos anteriores. En la unidad de control vienen integrados el sistema GNSS y el inercial (Leica IPAS 20). Las imágenes tienen un píxel de  $6.5\ \mu\text{m}$  y están formadas por líneas de 12 mil píxeles cada una. Existe la posibilidad de montar un cabezal con 8 CCD (SH81) o con 12 CCD (SH82), generando cada CCD una imagen continua diferente. Según la velocidad del avión puede registrar un GSD desde 3 a 15 cm. El montaje con 12 CCD tiene un precio aproximado de 975 mil euros (Leica, 2013).



Figura 87: Leica ADS80 y unidad de control CU80 y almacenamiento MM80.

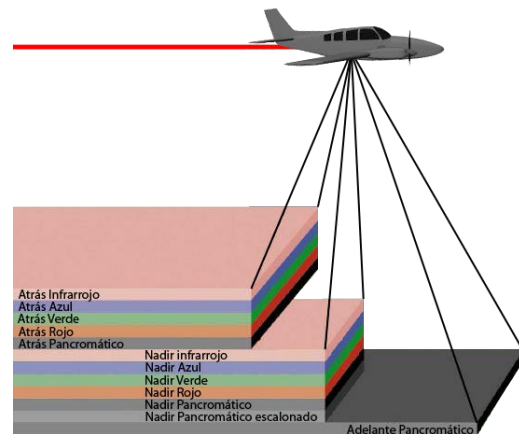


Figura 88: Registro con Leica ADS80.

La empresa austríaca Vexcel, adquirida por Microsoft en 2006 para proporcionar imágenes a su proyecto Bing, ofrece una amplia familia de cámaras digitales de área denominada UltraCam (Lp, Falcon y Eagle). Todas ellas capturan en pancromático, color e infrarrojo. Compensan el movimiento del avión utilizando un sistema TDI, igual que los satélites. El modelo UltraCamLp ofrece imágenes de 92 megapíxeles con un píxel de  $6\ \mu\text{m}$ . El modelo Falcon registra imágenes de 129 megapíxeles con un píxel de  $7.2\ \mu\text{m}$ . Y el modelo de mayor resolución, Eagle, genera imágenes de 250 megapíxeles con un píxel de  $5.2\ \mu\text{m}$ . Según la velocidad del avión, el modelo Eagle puede registrar un GSD desde 5 a 10 cm (Vexcel, 2013).



Figura 89: Microsoft Vexcel UltraCam Eagle.



Figura 90: Optech CS-15000.

Optech ha desarrollado la cámara CD-15000 con dos sensores de área que registran imágenes RGB de 143 megapíxeles. Tiene sistema FMC y permite registrar en infrarrojo simultáneamente. El tamaño del píxel es de  $5.2\ \mu\text{m}$  (Optech, 2013).

La cooperación de la empresa americana Wehrli y la ucraniana Geosystems ofrece la cámara digital de barrido 3-DAS-1 que dispone de tres sensores en el nadir,  $16^\circ$  hacia atrás y  $26^\circ$  hacia adelante que permitirá tener triple estereoscopía. Cada sensor tiene 8000 píxeles dispuestos en línea con un tamaño de  $9\ \mu\text{m}$ . Permite registrar un GSD de 4.5 cm en un vuelo de 550 m de altura. Además de este modelo, se ofrecen otros con diferentes montajes de sensores (Wehrli, 2013).



Figura 91: Wehrli & Geosystem 3-DAS-1.

La empresa alemana Jenoptik comercializa la cámara digital de barrido JAS 150s que equipa nueve sensores CCD lineales de 12000 píxeles de un tamaño de  $6.5\ \mu\text{m}$ . Al igual que los modelos de Leica o Wehrli, están dispuestos en tres posiciones: nadir, hacia atrás y hacia adelante, con ángulos de  $12^\circ$  y  $20.5^\circ$  indistintamente. Las bandas que registra son el pancromático, RGB e infrarrojo cercano. Permite registrar un GSD de 15 cm a 3000 m de altura de vuelo. Permite instalar IMU de IGI, Applanix o Leica (Jenoptik, 2013).



Figura 92: Jenoptik JAS 150s.

### 2.4.1.3. Estaciones fotogramétricas digitales

Como se ha comentado anteriormente, las estaciones fotogramétricas digitales están compuestas por el hardware y software necesario para tratar las imágenes registradas con cámaras aéreas para extraer información tridimensional de ellas haciendo uso de la estereoscopía. Las imágenes obtenidas de las cámaras aéreas tienen una gran precisión por lo que su tamaño en disco es igualmente grande. Estas estaciones deben permitir el movimiento rápido de las imágenes sin perder la visión estereoscópica por lo que suelen estar diseñadas para potentes tarjetas gráficas, utilizando dispositivos de movimiento 3D y sistemas de visión estereoscópica. Disponen de diversas herramientas de dibujo y visualización de los datos, como la superposición de datos vectoriales sobre las imágenes raster. Los procesos de orientación y aerotriangulación de las imágenes suele realizarse de manera automática o semi-asistida.

Además de imágenes procedentes de cámaras aéreas, estas aplicaciones suelen soportar imágenes procedentes de satélites, radar y LiDAR. Permiten obtener modelos digitales a partir de los datos vectoriales o mediante correlación automática. Con estos modelos y las imágenes, son capaces de generar las correspondientes ortofotos. Los datos vectoriales se pueden exportar a diversos formatos de programas CAD o SIG.

El precio de estas aplicaciones es superior a 12 mil euros.

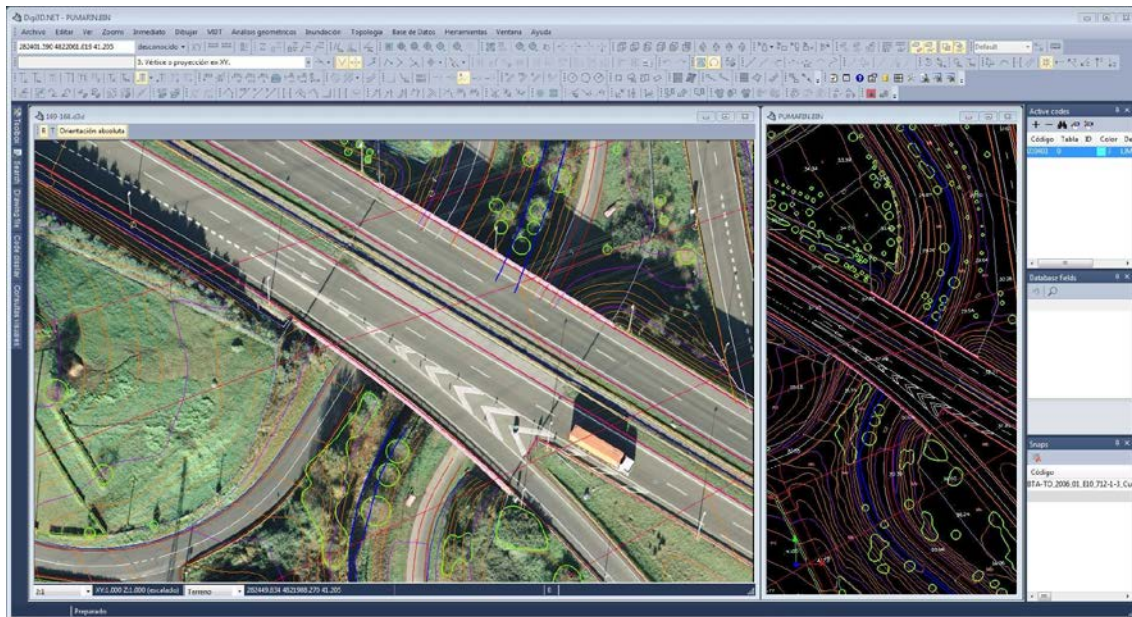


Figura 93: Vista del programa Digi3D con información vectorial sobre las imágenes aéreas (Digi21, 2013).

Algunas de las estaciones más importantes son:

- Datem Summit Evolution: Integrada en la empresa alemana Inpho del grupo Trimble (Inpho, 2013).
- Erdas LPS: Aplicación de Leica que ha sido incorporada sobre Erdas, herramienta de tratamiento digital de imágenes, sobre todo de teledetección (Leica, 2013).
- Intergraph ImageStation: Estación ofrecida por Intergraph, integrada en el grupo Hexagon, al igual que Erdas (Leica, 2013).
- Racurs Photomod: Estación fotogramétrica rusa (RACURS, 2013).
- DIGI 3D: Estación fotogramétrica digital de desarrollo completamente español (Digi21, 2013).

## 2.4.2. Fotogrametría de objeto cercano

Los mismos principios básicos de la fotogrametría aérea podrían ser aplicados a fotografías estereoscópicas tomadas desde el suelo o alturas pequeñas. Debido a esta escasa distancia, esta modalidad se denomina fotogrametría de objeto cercano o CRP (*Close-Range Photogrammetry*). Por tanto, se considera CRP a aquellos proyectos tomados con cámaras sobre trípode o montadas sobre UAV.

Sin embargo, la CRP no tiene las restricciones de perpendicularidad de la toma ni del uso de cámaras especiales (métricas). Existe una amplia variedad de cámaras de alta calidad que pueden utilizarse en estas condiciones, tanto métricas como no métricas, aportando

resoluciones de registro que pueden ser inferiores al milímetro, en función de cada proyecto.

Se podría utilizar el mismo proceso seguido en fotogrametría aérea para la extracción de información tridimensional utilizando CRP. Sin embargo, en los últimos años han aparecido herramientas informáticas que han simplificado el proceso, revolucionando esta modalidad de fotogrametría, aumentando su uso para la documentación de patrimonio: arquitectura, arqueología, arte y otros (Grussenmeyer, et al., 2002). De hecho, la necesidad de usuarios experimentados que tienen las aplicaciones de fotogrametría aérea no se requiere en este tipo de aplicaciones. Además los precios, tanto de las cámaras como del software de tratamiento, son mucho más asequibles que en fotogrametría aérea.

#### 2.4.2.1. Proceso fotogramétrico

Al igual que en fotogrametría aérea, el proceso fotogramétrico comienza con la realización de un proyecto donde quedarán reflejadas todas las tomas necesarias para cubrir la totalidad del objeto con la precisión requerida por el pliego de prescripciones técnicas. Se determinan los detalles que pueden actuar como puntos de control y asegurarse que aparecerán en el mayor número de fotografías posible. Además, en algunos proyectos es factible el uso de señales de puntería colocadas previamente y que, posteriormente, el software puede reconocer automáticamente para ayudar en la orientación de las imágenes.

En la mayoría de los proyectos de CRP se busca la generación de un MDT y la consecuente ortofoto de la imagen tomada. Sin embargo, con ciertas premisas en el trabajo de campo, se podrían obtener pares estereoscópicos para realizar un análisis 3D en estéreo similar al realizado en fotogrametría aérea. Esta posibilidad tiene varias ventajas ya que permite la interpretación de micro-relieve o la extracción manual de líneas estructurales para generar un modelo de tipo TIN de mayor precisión que los modelos de rejilla. Aunque estos datos extraídos manualmente suelen tener mayor precisión que los obtenidos automáticamente, se necesita una gran experiencia en restitución además de ser una tarea laboriosa, perdiendo la posibilidad de emplear determinados algoritmos de análisis del MDT.

La libertad de movimiento y posición de las cámaras en el caso terrestre permite que el proyecto de levantamiento fotogramétrico pueda ser configurado de dos maneras diferentes: el caso normal y el ajuste de haces.

##### a) Caso normal

El caso normal está basado en las mismas condiciones geométricas que los proyectos de fotogrametría aérea, ya explicados anteriormente. Se pretende simular el caso aéreo con cámaras en tierra, por lo que, una vez obtenidas las orientaciones exteriores de todas las imágenes, se podrá realizar la restitución fotogramétrica utilizando las mismas herramientas



que en el caso aéreo. Para ello, se deberán utilizar cámaras cuya configuración interna sea perfectamente conocida, es decir, cámaras métricas o realizar auto-calibración en el ajuste.

En el diseño de un proyecto basado en el caso normal, se deberá definir la posición de la cámara para realizar las tomas, teniendo en cuenta parámetros como la distancia al objeto de tal manera que se cumpla la precisión alcanzada en el registro y que todos los puntos del objeto queden, al menos, registrados en dos imágenes diferentes. Para asegurar que la precisión alcanzada sea la suficiente, las imágenes deberían ser lo más perpendiculares posibles al objeto y a la base (vector que une las posiciones de la cámara), lo cual puede obligar a la utilización de soportes especiales para estacionar las cámaras. Por ejemplo, en el diseño de un proyecto de CRP para registrar un edificio de gran altura (una torre de una iglesia), las fotografías deberían ser lo más ortogonales posibles a las paredes por lo que habría que instalar un sistema basado en andamios. Si el objeto a registrar está horizontalmente tendido sobre el suelo, como pueden ser restos arqueológicos o paleontológicos, se instalan estructuras que permiten colocar las cámaras en dirección nadiral.

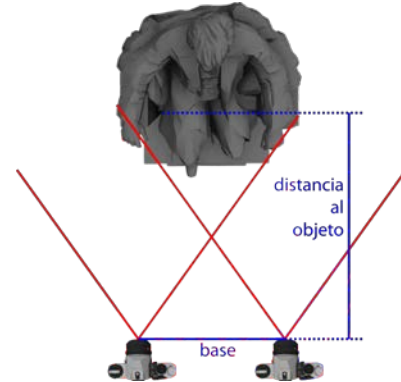


Figura 94: Geometría del par estereoscópico.

Además, para asegurar una inequívoca identificación tridimensional, la formación de la imagen estereoscópica es el resultado de una geometría donde están relacionadas la distancia al objeto, la base y la focal de la cámara.

$$\sigma_Z = m \frac{Z}{B} \sigma_{imagen} \quad \sigma_X = \sigma_Y = m \cdot \sigma_{imagen}$$

Donde  $m$  es el denominador de la escala de la fotografía, es decir:

$$m = \frac{Z}{f}$$

En estas fórmulas,  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_Z$  son las precisiones de los puntos en coordenadas objeto,  $\sigma_{imagen}$  es la precisión en la medida (tamaño del píxel),  $Z$  es la distancia al objeto,  $B$  es la distancia de la base y  $f$  es la focal de la cámara. Hay que notar que, en este caso, los ejes están orientados de tal forma que los ejes X e Y forman el plano focal de la imagen y el eje Z es perpendicular a este y en dirección al objeto (Kraus, 2007).

Una vez tomadas las imágenes, formando los correspondientes pares estereoscópicos y cubriendo toda el área del objeto, se georreferencian las imágenes. Para ello, se podrían utilizar técnicas topográficas-geodésicas para determinar las coordenadas de los puntos estación, mejorando y simplificando el cálculo. Además, las cámaras métricas suelen llevar niveles para asegurar la perpendicularidad de uno de los ejes. No obstante, resulta imprescindible la obtención de las coordenadas de puntos en el objeto que hayan quedado registrados en las imágenes. La precisión en la obtención de estas coordenadas deberá estar

en consonancia con las precisiones establecidas en el proyecto fotogramétrico. Con estos datos, se realiza un ajuste por pares, ya que, en estos casos, no existe el concepto de pasada.

Obtenidas las orientaciones exteriores de todas las imágenes, se podrían utilizar estaciones de fotogrametría digital para restituir fotogramétricamente el objeto, utilizando la estereoscopía formada en cada par. Hay que resaltar que cada par estereoscópico se registra utilizando su sistema de coordenadas particular, de tal manera, que se necesitarán realizar una serie de transformaciones posteriores para ensamblar toda la información restituida.

## b) Ajuste de haces

El caso normal en CRP es tan complejo como el proceso expuesto en el caso aéreo. Además, las cámaras métricas resultan caras tanto en su adquisición como en su mantenimiento.

Sin embargo, hoy en día existen cámaras no métricas de alta calidad y fácil uso que pueden ser aptas para el registro con gran precisión. Es más, las cámaras métricas terrestres prácticamente han dejado paso a estas nuevas cámaras digitales. Por otro lado, también han aparecido herramientas informáticas que permiten calcular los parámetros de calibración de estas cámaras junto con el cálculo de la orientación de las tomas. Estas aplicaciones suelen ser aplicaciones sencillas y flexibles que no requieren una gran rigurosidad en el diseño del proyecto. De hecho, al contrario de lo que ocurre en fotogrametría aérea y gracias a la libertad de actuación y movimiento que no posee un avión, se podría incrementar la cantidad de datos tomados o reducir las distancias al objeto sin incrementar con ello el coste del proyecto o poner en riesgo la precisión alcanzada.

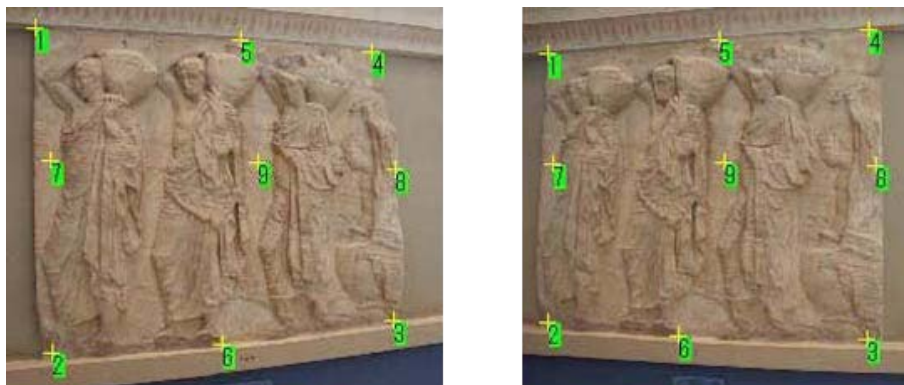


Figura 95: Identificación de puntos de control sobre dos fotogramas (Topcon, 2013).

En este caso, se dispone de un conjunto de imágenes del objeto donde se debe procurar que todos los puntos aparezcan en al menos dos y, deseablemente, tres imágenes. La orientación y posición de estas cámaras es libre, procurando que los ángulos formados por los rayos que llegan al objeto no sean demasiado agudos, pues se pondría en riesgo su precisión (Luhmann, et al., 2006). Los rayos de cada una de las imágenes formarán un conjunto de haces que debe ser ajustado y georreferenciado (figura 95). Este proceso de

ajuste se realiza mediante puntos comunes (del objeto) que aparezcan en las imágenes. Estos puntos tienen que identificarse monoscópicamente.

En el proceso de ajuste, se introducen como incógnitas las posiciones y orientaciones de cada una de las tomas. Incluso, si se utilizan cámaras no métricas, se pueden introducir los parámetros de orientación interna de la cámara (focal, posición del punto principal y parámetros de distorsión radial y tangencial) compensando los errores de distorsión que se tengan. Una de las principales fuentes de los errores sistemáticos en las coordenadas de los puntos es la estimación inadecuada de los parámetros de distorsión. Por ello, sería aconsejable llevar a cabo un proceso de auto-calibración. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que una configuración de geometría convergente minimiza el error en la estimación de los parámetros de distorsión de las lentes (Wackrow & Chandler, 2011).

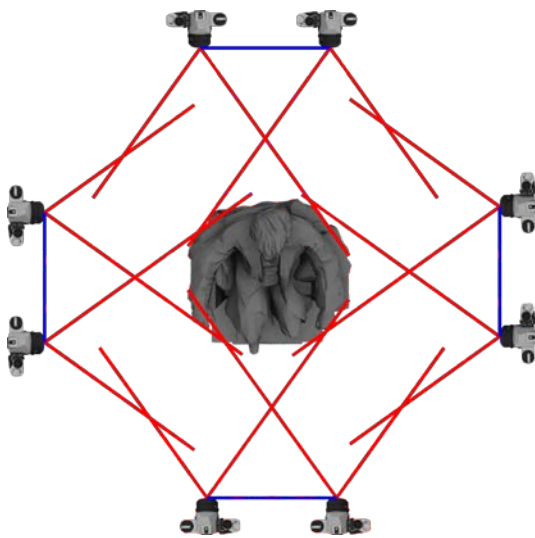


Figura 96: Proyecto con pares estereoscópicos.

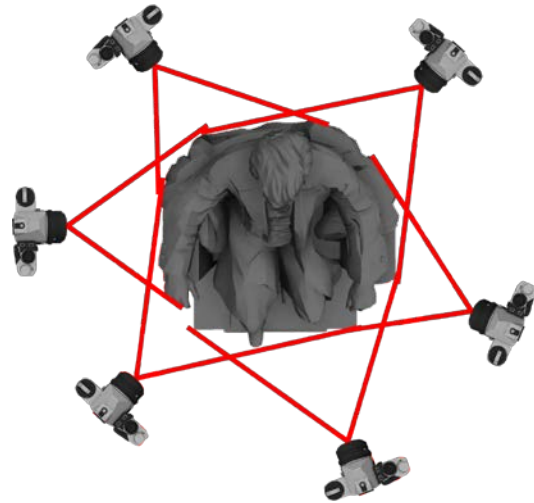


Figura 97: Proyecto con tomas convergentes.

El proceso de orientación de cada fotograma suele realizarse de forma manual, identificando puntos monoscópicamente, siendo el proceso de enlace entre imágenes automático.

Además, si se ha utilizado trípode, se pueden medir las coordenadas del estacionamiento mediante alguna técnica topográfica-geodésica e introducirlas en el cálculo, mejorando así el proceso de ajuste. Este procedimiento también es utilizado en fotogrametría desde UAV, donde también se suele disponer de sistemas inerciales INS por lo que se pueden introducir los parámetros de orientación OTF en el cálculo, reduciendo el número de incógnitas. De manera análoga, este proceso es igualmente utilizado en la orientación de imágenes tomadas con sistemas móviles MMS, como se detalla en el apartado 3.5.

Como resultado del cálculo, se obtienen las precisiones alcanzadas por los diferentes parámetros introducidos, cuyos valores deberán comprobarse para certificar que se cumplen las precisiones definidas en el proyecto. Asimismo, se obtendrán las orientaciones externas

de cada una de las imágenes, por lo que se estará en disposición de registrar el objeto tridimensionalmente. En este caso, no se puede realizar por medio de la estereoscopia, puesto que las imágenes no cumplen con las condiciones geométricas necesarias, tal y como se ha señalado anteriormente. Asimismo, tampoco se pueden utilizar las aplicaciones informáticas desarrolladas para fotogrametría aérea digital. Por tanto, el registro se realiza utilizando algoritmos de correlación automática obteniendo una densa nube de puntos que define tridimensionalmente el objeto. Estos algoritmos están disponibles en aplicaciones específicas, como se expone en el apartado 2.4.2.3. El modelo digital generado con esta nube de puntos es de tipo rejilla y debería tener una resolución de, al menos, tres veces la resolución de la imagen.

### 2.4.2.2. Cámaras digitales

Existe una gran variedad de cámaras no métricas, pero con gran calidad de imagen. Para un trabajo de CRP es importante elegir una cámara con alta resolución y óptica de calidad. Por ello, suelen utilizarse cámaras de formato medio. La mayoría es DSLR, es decir, cámaras réflex digitales, por lo que utilizan una única lente para enfocar en el plano focal. Estas cámaras suelen venir equipadas con componentes muy fiables, por lo que son más utilizadas que las cámaras compactas. Las distorsiones de las lentes con focal fija se pueden modular más fácilmente, pero también se pueden utilizar cámaras con zoom en proyectos que no sean de alta precisión. No obstante, permiten intercambiar objetivos y pueden ser “integradas” (con todo el montaje en el cuerpo) o “modulares con respaldo digital” (donde los sistemas de medición van separados de la electrónica llamada “respaldo”).

Las resoluciones que ofrecen las principales marcas de cámaras fotográficas superan los 20 megapíxeles llegando hasta 80 megapíxeles, con tamaños de píxel de 5 ó 6  $\mu\text{m}$ . Hasselblad consigue 200 megapíxeles con un sensor de resolución de 50, pero con un movimiento interno del sensor que aumenta la resolución en la imagen tomada. La mayoría de los sensores son CCD, pero también existen CMOS, más económicos. Los precios oscilan entre 3000 y 30000 euros.

Tabla 5: Características técnicas de cámaras digitales de medio formato.

Modelo	Tipo	Sensor	Resolución (Mpíxeles)	Píxel ( $\mu\text{m}$ )	Precio aprox. (€)
Mamiya 645DF Leaf Credo 80	Respaldo	CCD	80	5.2	30000
Hasselblad H4D-60	Respaldo	CCD	60	6	30000
Leica S2	Integrada	CCD	37.5	6	15000
Pentax 645D	Integrada	CCD	40	6	10000
Nikon D800E	Integrada	CMOS	36.3	4.9	3000
Canon EOS 5D Mark III	Integrada	CMOS	22.3	6	3000
Sony SLT-A99	Integrada	CMOS	24.3	6	2800





Figura 98: Cámaras digitales de medio formato. De izquierda a derecha, Mamiya 645, Pentax 645D, Leica S2 y Hasselblad H4D.

### 2.4.2.3. Aplicaciones informáticas

Tal y como se ha comentado anteriormente, otro de los pilares del éxito actual de la CRP es el empleo de potentes y, no por ello complejas, aplicaciones informáticas que permiten extraer información 3D a partir de fotografías realizadas a un objeto. Estas herramientas permiten la orientación de imágenes procedentes de cámaras métricas y no métricas, para la definición automática de un modelo digital, normalmente texturizado. La mayoría de ellas, poseen herramientas para el registro de entidades 3D, seleccionado sobre las fotos en monoscópico o en estereoscópico, si fuera posible. Además, suelen permitir el cálculo de la ortofoto de la escena. Existen muchas aplicaciones, algunas de las más importantes son las siguientes:

- PhotoModeler: Perteneciente a la empresa Eos Systems Inc. (Canadá). Puede utilizar señales de puntería para automatizar el proceso. Posee herramientas para digitalizar sin tener una pantalla de visión 3D. Su precio es de 2200 € (Eos Systems, 2013).
- PhoToPlan 3D: De la empresa alemana kubit. Es un módulo que trabaja con AutoCad. Permite la restitución sobre una o dos imágenes, pero no estereoscópicamente. Su precio es de 2200 € (kubit, 2013).
- iWitness: De la empresa australiana Photometrix. Especializado en mediciones de accidentes de tráfico y medidas forenses. Su precio es inferior a 1000 € (Photometrix, 2013).
- ImageMaster: Perteneciente a Topcon. Tiene cuatro versiones diferentes. Permite generar datos a partir de un par de imágenes utilizando sólo una distancia conocida. Su precio aproximado oscila entre 3000 € y 10000 € (Topcon, 2013).
- Photoscan: De la empresa rusa Agisoft. Su precio aproximado es de 2700 € (Agisoft, 2013).
- Pix4UAV: De la empresa suiza Pix4D. Aplicación destinada a la gestión de los datos registrados por medio de sistemas UAV. Tienen una versión para poder

trabajar desde Internet y cuyo precio depende de la extensión del proyecto (Pix4D, 2013).

- Smart3DCapture: De la empresa francesa Acute3D. También permite el tratamiento de proyectos procedentes de sistemas UAV (Acute3D, 2013).

### 2.4.3. Fotogrametría con vehículos no tripulados

#### 2.4.3.1. Introducción

Un UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) es una aeronave genérica diseñada para operar sin un piloto humano a bordo (UVS International, 2013). Este término ha sido utilizado en trabajos geomáticos, aunque existen otros términos para denominarlos. Aunque tiene su origen en el campo militar o de espionaje, desde la primera experiencia en 1979, los UAV se han convertido en una nueva herramienta para la medición fotogramétrica. De esta forma, se abren nuevas alternativas de bajo coste en el ámbito de la fotogrametría aérea y terrestre.



Figura 99: Helicóptero UAV con cámara instalada.

Actualmente, existen más de veinte modelos comerciales de UAV para registro cartográfico. La rápida expansión de estas nuevas alternativas se puede explicar gracias a la reducción de costes y tamaños de los dispositivos que deben transportar estas plataformas, ya que es necesario incluir cámara (óptica, de video, infrarroja, térmica, etc.), dispositivos de posicionamiento GNSS/INS e incluso LiDAR (Remondino, et al., 2011). Según el tipo de plataforma que se disponga así será la carga que es capaz de transportar, directamente relacionada con la complejidad de los sensores. A mayor capacidad de carga, mejores dispositivos y, por tanto, mejores precisiones de los datos capturados.

A pesar de ser incluidos en la sección de técnicas fotogramétricas, estos equipos también pueden llevar equipado un sensor LiDAR. Según la altura de vuelo del UAV, podría ser considerado como LiDAR aerotransportado o LiDAR terrestre. La instalación de un sensor LiDAR obliga a incorporar mejores componentes de posicionamiento, sobre todo de tipo inercial. Si el dispositivo sólo realiza fotografías, sólo se necesita conocer la orientación GNSS/INS en el momento del disparo. Pero si, además, lleva incorporado un sensor LiDAR, éste registra de forma continua por lo que es necesario tener un gran control de la posición y orientación de todo el sistema en cada momento, no siendo esto siempre posible.

La instalación de los sensores de registro (cámara óptica y/o LiDAR) no tiene que estar orientada en el nadir del vehículo. En determinados proyectos, podría ser interesante

tener una orientación horizontal, por ejemplo, para registrar laderas, escarpados, fachadas de edificios o monumentos. En estos casos, los proyectos son considerados de fotogrametría de objeto cercano o LiDAR terrestre.

Según la UVS, existen tres categorías de UAV: para misiones especiales, estratégicos y tácticos. Los primeros están destinados a objetivos militares. Los segundos están diseñados para vuelos a grandes alturas, superiores a 20 mil metros. Y los terceros, serían el resto, que pueden ser de ala fija o rotatoria. De hecho, la definición incluye globos, cometas, planeadores, dirigibles, aviones y helicópteros con la posibilidad añadida de adquirir datos en modo manual, semiautomático y automático

De esta forma, estos dispositivos están capacitados para obtener imágenes y datos 3D con los que se podrían obtener ortofotografías en post-proceso. Los posibles campos de actuación actuales se centran en aplicaciones forestales o agrícolas, arqueología y documentación de patrimonio, medio ambiente, control de tráfico o reconstrucción y registro tridimensional en general. De hecho, cada vez son más los proyectos en los que se están intentando incluir estos dispositivos para propósitos cartográficos, aunque todavía se tienen ciertas limitaciones en las precisiones alcanzadas en los datos medidos debido, sobre todo, a la inestabilidad en vuelo. Por ello y a pesar de llevar incorporados sistemas de posicionamiento en tiempo real, es necesaria la medida de puntos de apoyo en campo, así como la orientación de las imágenes y aerotriangulación del vuelo para controlar errores.

Por otro lado, la tendencia actual de la fotogrametría UAV es el uso de vehículos autónomos, ya que los sistemas controlados manualmente están muy afectados por las condiciones ambientales. Para ello, es necesaria una automatización del vuelo y mejoras en la automatización del flujo de trabajo. Además, es necesaria una normativa que regule el empleo de estos dispositivos para evitar problemas de navegación aérea, ya que ni siquiera tienen comunicación con tráfico aéreo.

#### 2.4.3.2. Características técnicas

El vuelo de estos dispositivos es autónomo pero supervisado por personal en tierra, comprobando parámetros como velocidad, altitud o distancias recorridas. La mayoría de los sistemas siguen un plan de vuelo previamente diseñado en gabinete, aunque ciertos sistemas de bajo coste realizan medidas en intervalos fijos de tiempo. Estos planes están diseñados para cumplir con la precisión requerida y cubrir toda el área de trabajo.

Resulta siempre adecuado poder calibrar y orientar las cámaras en procesos independientes, aunque determinados sistemas realizan una auto-calibración en vuelo. En fotogrametría aérea clásica el proceso de orientación y calibración se realiza mediante la aerotriangulación. Sin embargo, esto no es posible en fotogrametría terrestre debido a las diferencias entre tomas, la geometría convergente o recubrimientos irregulares. Por otra parte, destacar que los datos UAV son más cercanos a la fotogrametría terrestre que a la fotogrametría aérea. Aunque últimamente han aparecido nuevas técnicas para la

identificación automática de entidades comunes entre imágenes (PhotoModeler Scanner o PhotoScan y otros, descritos en el apartado 2.4.2.3), es aconsejable que un operador de fotogrametría identifique los puntos. En el cálculo y según las necesidades de precisión, se pueden utilizar los datos de posicionamiento como datos aproximados o fijos.

No obstante, a pesar de que resulta sencillo obtener imágenes orientadas con estos dispositivos, no es fácil alcanzar las imágenes ajustadas al proyecto de vuelo diseñado según las precisiones que se requieren en fotogrametría. El origen de esta dificultad estriba, sobre todo, a la falta de estabilidad de los dispositivos, aunque también es debido a la falta de precisión y calibración de los componentes utilizados. No hay que olvidar que estos dispositivos han sido diseñados desde un punto de vista de ahorro económico, por lo que resulta difícil cumplir, en la práctica, requerimientos de precisión que se exigen a otros proyectos fotogramétricos de mayor envergadura. Sin embargo, para muchas aplicaciones podrían ser suficientes puesto que ofrecen imágenes georreferenciadas de forma rápida, aunque luego no se pueda realizar restitución fotogramétrica con ellas. Para paliar esta deficiencia, algunos dispositivos llevan incorporados cámaras estereoscópicas, por lo que en cada disparo generan un par que puede ser restituido posteriormente.

Una vez orientadas todas las imágenes, el proceso de extracción de un modelo 3D es similar al utilizado en fotogrametría clásica. Se pueden digitalizar estereoscópicamente entidades donde sea posible o se podrán obtener nubes de puntos por medio de correlación automática. Las estereoscopía no siempre es posible debido, sobre todo, a recubrimientos incorrectos o geometría convergente. De hecho, y como se ha comentado anteriormente, para el proceso de correlación automática se utilizan preferiblemente algoritmos diseñados para fotogrametría de objeto cercano, como los referidos en el apartado 2.4.2.3.

Finalmente, combinando las imágenes orientadas y el modelo 3D extraído se calculan las ortofotografías de la zona, que suele ser el producto más demandado de estos dispositivos. Existen aplicaciones comerciales que realizan este proceso de forma automática y en un breve espacio de tiempo, por lo que es posible la utilización de estos equipos en casos de urgencia.

### 2.4.3.3. Aplicaciones

Las aplicaciones de los UAV residen en aquellos proyectos donde no es posible acceder con otros dispositivos de medición (fotogrametría aérea convencional, láser terrestre, GNSS o topografía clásica) debido a las condiciones ambientales o meteorológicas (sobre todo, nubes, pues vuelan por debajo de ellas), a la orografía del terreno, a la premura de obtención de datos o la peligrosidad de la zona. Por ejemplo, podría ser en zonas de desastres naturales, zonas montañosas y volcánicas, zonas inundadas, terremotos, zonas desérticas, escenas de accidentes, fachadas de edificios o monumentos de gran altura, etc. De hecho, esta posibilidad de acceso a determinadas aplicaciones especiales es la principal ventaja de estos dispositivos.

La inmediatez de datos (tiempo real) es otra de las ventajas de los UAV. Sin embargo, en este punto se deben distinguir entre las aplicaciones de alto nivel de precisión

(centimétrica), por ejemplo la producción de MDT y ortofotos, y las de bajo nivel (de orden métrico) con documentación o supervisión de zonas. Los UAV tienen capacidad de adquirir imágenes en tiempo real, pero si se desea alta precisión en los resultados es necesario un procesamiento posterior. Sin embargo, no todos los paquetes de software comercial para el procesamiento de datos fotogramétricos soportan imágenes UAV, existiendo problemas para realizar las orientaciones de las fotos o la aerotriangulación del proyecto.

El precio de estos dispositivos no es elevado, tanto en el momento de la adquisición como en el momento de su funcionamiento, ya que no precisan de grandes cantidades de combustible, ni un piloto experimentado (Johnson, 2006). Gracias a ello, ha aumentado el número de proyectos donde están siendo utilizados, sobre todo en trabajos arqueológicos o monitorización de áreas forestales o agrícolas. Estos trabajos se están realizando con dispositivos tan asequibles como globos aerostáticos (cautivos o móviles), dirigibles o pequeños helicópteros autónomos.

Son aparatos sencillos de manejar mediante control remoto, pero no están exentos de accidentes. De hecho, su fragilidad hace que los componentes elegidos para la adquisición de datos no sean demasiado costosos, lo cual repercute directamente en la calidad de los resultados. Por ello, los UAV se limitan a volar en la línea de visión y de operación de un piloto en tierra. La distancia máxima de vuelo dependerá de la habilidad del piloto para detectar y seguir la orientación del dispositivo. Por tanto, se requiere un piloto bien entrenado, capaz de maniobrar e interactuar con el sistema de manera eficiente.

Sin embargo, la principal limitación de los UAV es la carga máxima que pueden transportar, por lo que se suelen equipar con elementos compactos y ligeros, lo que limita las posibilidades. Por ejemplo, se suelen utilizar cámaras de pequeño o medio formato, por lo que se necesita adquirir mayor número de imágenes que las cámaras de gran formato utilizadas en vuelos tripulados, para obtener la misma cobertura y resolución de imagen. Estas limitaciones de carga también influyen sobre el resto de sensores y unidades de navegación, lo que supone resultados menos precisos para la orientación de los sensores, traduciéndose en una menor calidad de los datos.



















































Otros problemas menores que pueden afectar sobre el tipo de proyectos abordables serían la ausencia de toma de decisiones en caso de imprevisto (por ejemplo, modificación de la dirección de vuelo debido a un obstáculo), rectificación de la trayectoria debido a las condiciones meteorológicas (viento), el tiempo máximo de vuelo, la distancia máxima respecto del controlador en tierra y la altura de vuelo. Estos parámetros son variables en función del tipo de UAV utilizado, aspecto que se mostrará en el siguiente apartado.

#### 2.4.3.4. Tipología

El Manual de Fotogrametría (ASPRS, 2004) clasifica las plataformas fotogramétricas existentes en aéreas, satelitales y terrestres. Dentro de las plataformas aéreas, se clasifican en aviones con uno o dos motores y otras plataformas, donde se incluirían los vehículos de vigilancia y reconocimiento no tripulados, helicópteros y globos.

Se podría realizar una clasificación más detallada de los dispositivos UAV disponibles, categorizando sus características, aunque habría que añadir el precio medio de cada tipo, pues es un factor determinante cuando se decide elegir este tipo de dispositivos (Eisenbeiß, 2009). Esta clasificación se muestra en la siguiente tabla, donde se categorizan utilizando colores: verde es óptimo, amarillo es intermedio y rojo es inadecuado.

Tabla 6: Clasificación de los UAV.

Tipo de vehículo	Distancia máxima	Dureza	Dependencia meteorología	Maniobrabilidad	Capacidad de carga
Globo					
Dirigible					
Planeador, cometa					
Planeador de ala fija					
Motores de hélice					
Cometa con rotor					
Helicóptero					
Coaxial					
Cuadrocóptero					
Multicóptero					

Si se utiliza un VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*) se tendrá la ventaja de no necesitar pista de despegue y aterrizaje, pudiendo además permanecer estacionario sobre un punto mientras la cámara está girando y registrando. Al mismo tiempo, pueden acercarse más al objeto que los basados en ala fija.

Si se utiliza un dispositivo de ala fija podrá permanecer más tiempo volando y cubrir zonas mayores. Las cometas, dirigibles y globos no necesitan energía y la altura de vuelo y movimiento es controlada por un operador utilizando una cuerda, pero están muy afectados por las condiciones meteorológicas (principalmente, viento).

Las siguientes figuras muestran, de izquierda a derecha y de arriba abajo, ejemplos de planeador de ala fija, cuadrocóptero, helicóptero y multicóptero.





Figura 100: Gatewing X100 de Trimble.



Figura 101: Microdrones md4-1000.



Figura 102: ARCAA Helicopter UAS.



Figura 103: Aibotix Aibot X6 con cámara térmica.

El precio de estos sistemas puede alcanzar los 50 mil euros, como en el caso del Trimble Gatewing (Trimble, 2013).

Por otro lado, y a medio camino entre las aplicaciones aéreas y de satélite, están apareciendo UAV HALE (*High Altitude, Long Endurance*) y MALE (*Medium Altitude, Long Endurance*) que son vehículos no tripulados que pueden estar volando durante un mes utilizando energía solar, a una altura entre 15 mil y 20 mil metros (Everaerts, 2008).



Figura 104: Pegasus Mercator.

Ejemplos de este tipo de dispositivos, son el modelo belga Pegasus Mercator que lleva incorporada una cámara (MEDUSA) con cuatro bandas espectrales y 12 mil píxeles con un GSD de 20 cm. Proyecto similares son el DARPA Vulture (5 años volando) y SolarEagle (lanzamiento programado para 2014), ambos de Boeing, QinetiQ Zephyr de la Universidad de Newcastle (estuvo volando 2 semanas a una altura de casi 22 mil metros) o Global Observer de la empresa americana AeroVironment.

#### 2.4.4. Productos generados

Como resultado del proceso fotogramétrico, en cualquiera de sus ámbitos, se puede obtener un conjunto de puntos con coordenadas tridimensionales en un sistema de referencia. Como se ha visto, estos puntos podrán haber sido registrados de forma asistida por un operador de fotogrametría utilizando estereoscopia o mediante algún algoritmo matemático como puede ser la correlación automática de imágenes. Además, aprovechando su principal característica, la estereoscopia, se podrán registrar más elementos tridimensionales sobre el objeto como pueden ser elementos lineales definitorios de su forma. Esto permitirá extraer mapas vectoriales o de línea, comúnmente utilizados para la elaboración de cartografía.

Con la combinación de ambas fuentes de datos se pueden definir modelos digitales con gran precisión ya que se han podido digitalizar aquellas entidades que representan la estructura del objeto fotografiado. Estos modelos digitales suelen tener estructura irregular (TIN) para aprovechar la ubicación de las líneas estructurales, aunque también se pueden generar modelos basados en rejillas (DEM). Aprovechando los modelos digitales calculados y las fotografías obtenidas como fuente de datos, se pueden generar nuevas imágenes rectificadas de las deformaciones producidas por la proyección cónica y el relieve del objeto. Es decir, se pueden generar ortofotos georreferenciadas ampliamente utilizadas en muchos sectores de gestión de información geográfica. Por último, con los modelos digitales, las imágenes y los elementos restituidos es posible generar modelos tridimensionales texturizados con objetos produciendo escenas de realidad virtual, de gran utilidad para la visualización interactiva de zonas u objetos.

#### 2.4.5. Aplicaciones

La principal aplicación de la fotogrametría reside en la generación de mapas topográficos, tanto en formato vectorial (mapas de línea) como raster (ortofotos). Gracias a la estereoscopia que la caracteriza y al registro multiespectral se puede medir, analizar e interpretar las formas de los objetos, desde extensiones como la de un planeta hasta nanotecnología. La fotogrametría aérea es, por tanto, la principal fuente de datos de las Bases de Datos Topográficas (BDT) y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Por su lado, la fotogrametría de objeto cercano puede ser empleada en ámbitos tan amplios como el registro arquitectónico o arqueológico para documentación, conservación o restauración de patrimonio, la medición y control de obras de ingeniería, la medida de modelos artísticos, de animación o cinematográficos, control de movimientos o deformaciones de los objetos, reconstrucción de accidentes, aplicaciones biomédicas y muchos otros.

Aunque en el pasado el registro mediante fotogrametría estaba reservado a expertos, hoy en día se ha abierto el acceso a usuarios no expertos con la aparición de nuevos algoritmos matemáticos que automatizan los procesos y a cámaras más económicas que permiten el registro con gran precisión y detalle.



## 2.5. Teledetección

### 2.5.1. Introducción

La teledetección de gran resolución comenzó en la década de los sesenta del siglo XX con el lanzamiento de los satélites del proyecto militar Corona por parte de la NASA que utilizaban cámaras y radiómetros pasivos. La Unión Soviética paralelamente desarrolló el proyecto KVR-1000 de características y propósitos similares.

Quince años después, la NASA lanzaba el primer LANDSAT que permitía obtener imágenes con decenas de metros de resolución en los canales del visible y el infrarrojo. El primer sensor óptico con precisiones útiles para cartografía fue el SPOT-1 en 1986 con un GSD pancromático de 10 m.

Actualmente, el número de satélites de alta resolución está creciendo constantemente y numerosas agencias espaciales están constantemente anunciando nuevos lanzamientos con satélites que mejoran las prestaciones de sus antecesores. Los objetivos perseguidos por estos satélites pueden ser muy variados así como las resoluciones alcanzadas.

En 2003, la UNESCO y la ESA pusieron en marcha el acuerdo “*Open Initiative*”, en el que se anima a utilizar datos de satélite para el control de patrimonio mundial, tanto cultural como natural, para alertar posibles riesgos debido a cambios en el uso del suelo. En 2010 estaban adscritos al acuerdo 53 socios, entre agencias espaciales, universidades, institutos de investigación y empresas privadas.

Para clasificar las diferentes alternativas, se va a diferenciar entre sensores pasivos y sensores activos, en función de si emiten algún tipo de radiación para realizar la medición. Los sensores pasivos son, fundamentalmente, sensores ópticos que utilizan el espectro visible e infrarrojo para realizar el registro. Los sensores activos son, fundamentalmente, sensores basados en la emisión de microondas para realizar las mediciones. Entre estos dos tipos existe una gran competencia para recoger información destinada a cartografía que puede llegar hasta una escala de 1:2000.

A continuación, se va a realizar una revisión sobre los sensores disponibles en la actualidad en el mercado y sus posibilidades relacionadas con la recogida de datos y aplicaciones cartográficas (eoPortal, 2013).

### 2.5.2. Sensores pasivos

Los sensores pasivos recogen información sobre las bandas situadas en la parte del visible más la parte del infrarrojo. Algunos de ellos registran imágenes estereoscópicas en el mismo paso de órbita ya que llevan incorporadas varias cámaras con diferente orientación. Otros, sin embargo, ofrecen estereoscopia con órbitas vecinas, lo que puede originar problemas de similitud de imágenes ya que, en el mejor de los casos, habrá una diferencia de un día, por lo que la situación y meteorología puede haber variado. Las imágenes deben corregirse utilizando polinomios RPC para poder realizar, posteriormente, la orientación relativa entre dos imágenes con solape y obtener información altimétrica (Baltsavias, et al., 2006). La obtención de información se puede realizar mediante restitución fotogramétrica o mediante correlación automática para generar un modelo digital del terreno, como ya se indicó en el apartado de técnicas fotogramétricas. Algunas empresas propietarias de satélites ofrecen directamente como producto el modelo digital o la ortofoto ya calculada. Obviamente, estos modelos digitales son menos precisos que los obtenidos por medio de imágenes aéreas. Sin embargo, sus principales ventajas están en la gran superficie de terreno que son capaces de registrar en poco tiempo, la disponibilidad y repetitividad de imágenes en un período corto de tiempo, dependiendo del satélite, y la posibilidad de obtener imágenes multiespectrales (Binet, 2009).

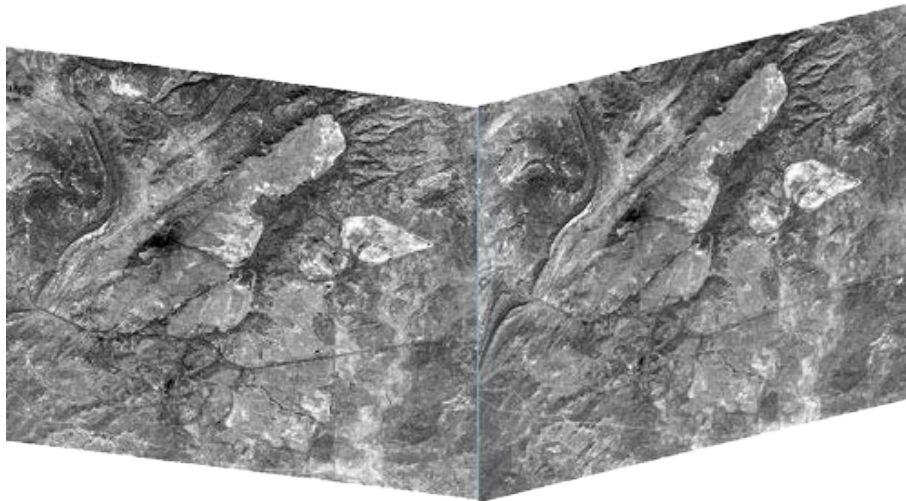


Figura 105: Par estereoscópico de imágenes pancromáticas adquiridas con el satélite WorldView-1 con una resolución de 0.5 metros.

De acuerdo con estas características, se podría hacer referencia a tres parámetros que caracterizan un sensor y que son la resolución espacial, la resolución temporal y la resolución espectral.

La resolución espacial es el tamaño del GSD que es capaz de registrar. Se van a diferenciar entre satélites de alta resolución cuyo GSD está entre 0.6 y 4 m y satélites de media resolución con un GSD entre 4 y 30 m. Cabe advertir que EE.UU. no permite distribuir datos en color con una resolución mayor a medio metro. Si el satélite tiene posibilidad de registrar imágenes en pancromático y multiespectral, normalmente, la resolución será mayor (hasta cuatro veces) para las imágenes pancromáticas. Sin embargo,

ofrecen una imagen resultado de realizar un *pan-sharpening*, consistente en una interpolación de los datos multispectrales a partir de la información pancromática.

La resolución temporal es la frecuencia con la que el sensor registra de nuevo una zona. Se considera una alta resolución cuando tarda menos de tres días, media resolución hasta 16 días y de baja resolución para el resto.

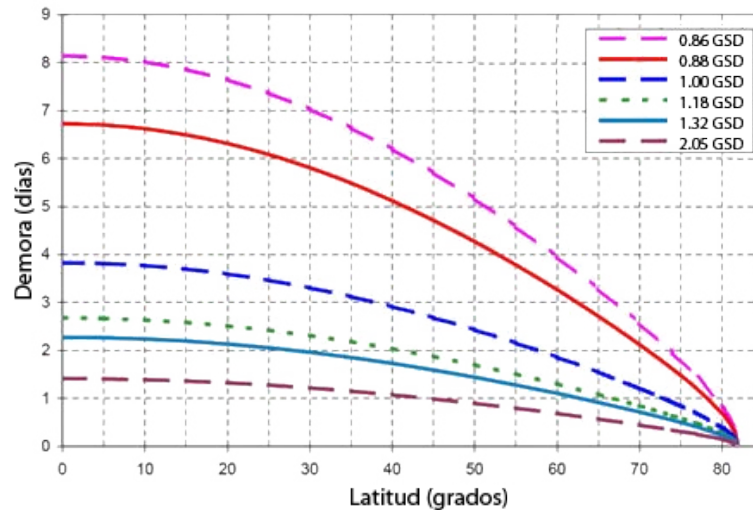


Figura 106: Resolución temporal de IKONOS.

La resolución espectral es el número de bandas espectrales que permite registrar y dónde se sitúan dichas bandas en el espectro electromagnético. Se considera una alta resolución espectral si registra más de 15 bandas, media resolución entre 3 y 15 bandas y de baja resolución para el resto.

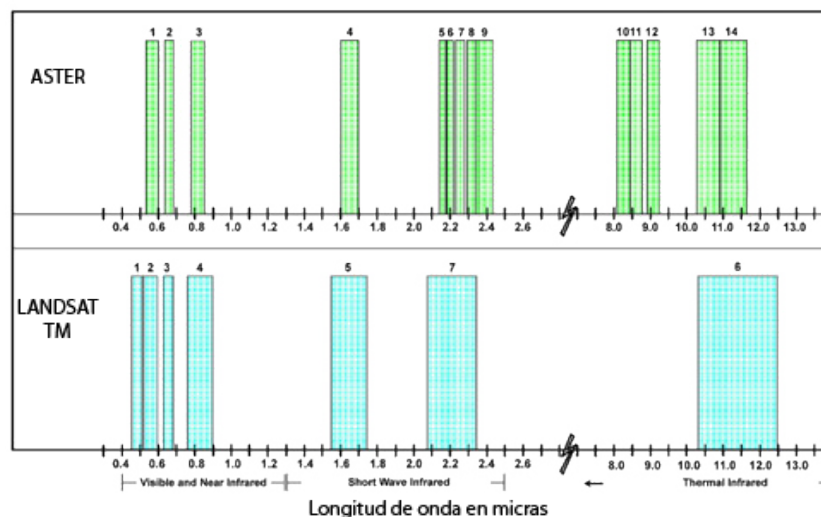


Figura 107: Resolución espectral de LANDSAT Thematic Mapper y ASTER.

La elección de los datos de un satélite u otro para una determinada aplicación depende del valor de estos tres parámetros. Sin embargo, cabe destacar que una alta resolución espacial está asociada con una baja resolución espectral y viceversa.

A continuación, se detallan de manera sucinta las características de los sensores pasivos utilizables para la realización de cartografía, es decir, que al menos ofrezcan un GSD de 30 m (Jacobsen, 2006).

Tabla 7: Tabla resumen de los satélites ópticos de gran resolución.

Satélite	Empresa	Año	P1	P2	P3	Ancho
GeoEye-1	GeoEye	2008	0.41	1.65	3	15.2
GeoEye-2	GeoEye	2013	0.34	1.36	-	-
IKONOS	GeoEye	1999	0.82	3.2	3	11
SPOT-5	Astrium	2002	2.5	10	2	60
SPOT-6	Astrium	2012	1.5	6	1	60
Pléiades	Astrium	2012	No tiene	0.5	1	24
QuickBird	DigitalGlobe	2001	0.61	2.44	2.5	15
WorldView-1	DigitalGlobe	2007	0.5	No tiene	1.7	17.6
WorldView-2	DigitalGlobe	2009	0.46	1.85	1.1	16.4
WorldView-3	DigitalGlobe	2014	0.31	1.24	1	-
OrbView-4	Orbimage	2001	1	4	3	8
ALOS	JAXA	2006	2.5	10	46	70
CARTOSAT-1	ISRO	2005	2.5	No tiene	5	30
CARTOSAT-2	ISRO	2007	1	No tiene	4	9.6
FORMOSAT-2	NSPO	2004	2	8	1	24
RapidEye	RapidEye	2008	No tiene	6.5	1	77
ASTER	NASA/Japón	1999	No tiene	15	16	60
CBERS-2	China/Brasil	2003	20	20	26	113
CBERS-3 y 4	China/Brasil	2013	5	10	52	60
LANDSAT 7	NASA/USGS	1999	13	30	16	185

Donde:

- P1: Resolución espacial de las imágenes pancromáticas en metros.
- P2: Resolución espacial de las imágenes multiespectrales en metros.
- P3: Resolución temporal en días.
- Ancho: Ancho de barrido en kilómetros.

### 2.5.2.1. Alta resolución

El primer satélite óptico de alta precisión fue Corona, que estuvo registrando imágenes entre 1959 y 1972 con fines militares. Después de 20 años, sus imágenes se han desclasificado y han podido emplearse con fines civiles. Estas imágenes han servido para la generación de modelos digitales, detección de cambios o numerosos proyectos de registro arqueológico como asentamientos humanos, tumbas megalíticas o restos paleolíticos (por ejemplo, los descubiertos en el norte de Siria por un equipo de investigación de la Universidad Nacional Australiana en 2006). Contaba con dos cámaras panorámicas pancromáticas y su resolución espacial máxima fue de 1.8 m.



Figura 108: Satélite Corona.

Hoy en día, los satélites ópticos han aumentado mucho, tanto en número como en calidad de datos, y numerosos países cuentan con sensores independientes propios. Su precisión alcanza valores válidos para convertirse en una interesante opción para el registro de cartografía hasta la escala 1:2000. Algunos de los satélites que a continuación se relacionan, permiten recoger imágenes estereoscópicas en el mismo paso de órbita mediante tres sensores orientadas hacia el nadir, hacia atrás y hacia adelante, como las cámaras aéreas digitales de barrido (por ejemplo, Leica ADS80). La mayoría están equipados con el sistema TDI (*Time Delay Integration*) para contrarrestar la velocidad del satélite (7 km/s aproximadamente) y registrar con alta precisión.

#### a) GeoEye

El satélite GeoEye-1, perteneciente a la empresa GeoEye y lanzado en 2008, es uno de los más sofisticados, capaz de adquirir datos pancromáticos con una precisión de 0.41 m y datos multiespectrales con una precisión de 1.65 m. Además, tiene una resolución temporal de tres días, registrando 350 mil km<sup>2</sup> al día de imágenes multiespectrales. GeoEye espera lanzar durante 2013 la siguiente versión, GeoEye-2, con una resolución espacial de 0.34 m en pancromático y 1.36 m en multiespectral.

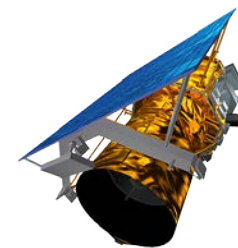


Figura 109: Satélite GeoEye-1.

#### b) IKONOS

Este satélite, también perteneciente a GeoEye, fue lanzado en 1999. Tiene una resolución espacial de 3.2 m en los datos multiespectrales y de 0.82 m en los datos pancromáticos e infrarrojo cercano (NIR). Registra 240 mil km<sup>2</sup> al día de imágenes multiespectrales. Gracias a la estereoscopía que se puede formar con sus imágenes, es adecuado para cartografía urbana y rural, obras de ingeniería, arqueología o medio ambiente, permitiendo calcular de manera automática el modelo digital y la ortofoto (Jacobsen, 2003).

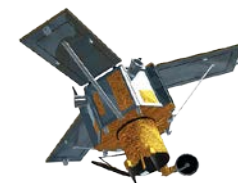


Figura 110: Satélite IKONOS.

### c) SPOT

El satélite SPOT-5, lanzado en 2002, pertenece a Astrium. Ofrece imágenes pancromáticas con una resolución espacial de 2.5 m e imágenes multiespectrales con una resolución de 10 m. El ancho de banda es de 60 km. Permite obtener imágenes estereoscópicas (mediante tres puntos de vista diferentes) en una sola pasada por lo que se pueden obtener modelos digitales y ortofotos con rapidez.

En 2012, Astrium lanzó el SPOT-6, con una resolución espacial de las imágenes pancromáticas de 1.5 m y de 6 m para las multiespectrales. Su resolución temporal es diaria.

SPOT-6 forma parte, junto a los satélites Pléiades y al futuro SPOT-7 (lanzamiento previsto para 2014), del programa ORFEO. Este programa es el resultado de la cooperación entre las agencias espaciales francesa e italiana para desarrollar un sistema de registro de la Tierra con resolución espacial sub-métrica y resolución temporal de 12 horas en cualquier punto de la Tierra.

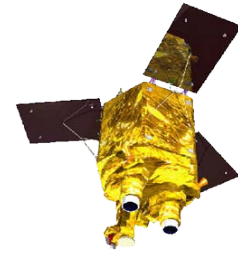
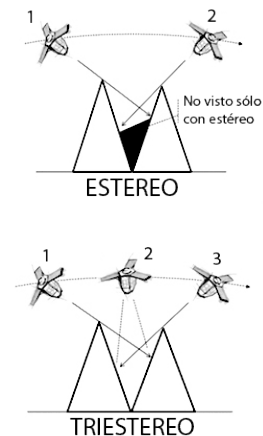


Figura 111: Satélite SPOT-6.



### d) Pléiades

Satélite de pequeño tamaño perteneciente a la empresa Astrium que proporciona imágenes ortorrectificadas en color con una resolución de 0.5 m y un barido de 20 km de lado. Tiene una resolución temporal de 24 horas, registrando un millón de km<sup>2</sup> al día. Es capaz de tomar imágenes estereoscópicas y tri-estereoscópicas de alta resolución en una pasada, lo que permite generar modelos digitales de 1 m de precisión. Se pueden solicitar imágenes tan sólo seis horas después de ser tomadas, por lo que pueden utilizarse para gestión de urgencias. El segundo satélite de la constelación, Pléiades 1B ha sido lanzado en diciembre de 2012. Como se ha comentado anteriormente, el programa Pléiades forma parte del acuerdo de cooperación ORFEO (Gianinetto, 2005).

Figura 112: Estereoscopia y triestereoscopia con SPOT y Pléiades.

### e) QuickBird

Satélite de la empresa DigitalGlobe que permite capturar imágenes pancromáticas con una resolución espacial de 0.61 m y multiespectral de 2.44 m. Fue lanzado en 2001 y tiene una resolución temporal de 2.5 días, recogiendo 200 mil km<sup>2</sup> al día. Ofrece imágenes estereoscópicas para la realización de cartografía, modelos digitales y ortofotos (Jacobsen, 2003).



Figura 113: Satélite QuickBird.



#### f) WorldView

El satélite WorldView-1, de la empresa DigitalGlobe, fue lanzado en 2007 y recoge imágenes pancromáticas con una resolución espacial de 0.5 m. Su resolución temporal es de 1.7 días y es capaz de tomar 1.3 millones de km<sup>2</sup> cada día, proporcionando imágenes con estereoscopía en una sola pasada.

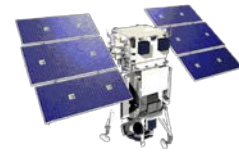


Figura 114: Satélite WorldView-1.

En 2009, DigitalGlobe lanzó el satélite WorldView-2 que proporciona 0.46 m de resolución espacial en las imágenes pancromáticas y 1.85 m en las imágenes multiespectrales de ocho bandas. Tiene una resolución temporal de 1.1 días y es capaz de tomar un millón de km<sup>2</sup> al día. Al igual que el modelo anterior, proporciona imágenes con estereoscopía en una sola pasada.

En 2014, DigitalGlobe prevé lanzar el WorldView-3, que tendrá 0.31 m de resolución espacial en imágenes pancromáticas, 1.24 m en multiespectrales y 3.7 m en el infrarrojo. Su resolución temporal será inferior a 24 horas.

#### g) OrbView

Familia de satélites de la empresa OrbView. El primero de ellos fue lanzado en 1995 y el cuarto y último en 2001. Tiene una resolución espacial en las imágenes pancromáticas de un metro y de cuatro metros para las multiespectrales. Actualmente, está fuera de servicio.

#### h) ALOS

Este satélite, denominado DAICHI en japonés, de la agencia espacial japonesa (JAXA) fue lanzado en 2006 y tiene la posibilidad de registrar imágenes pancromáticas con estereoscopía (en el nadir, adelante y atrás) e imágenes multiespectrales en el visible y el NIR. Pero también va equipado por un sensor PALSAR que permite registrar datos con condiciones climatológicas adversas con una precisión de 10 m. Es uno de los satélites para cartografía más grandes que existen, con un peso de 4 toneladas. Tiene una resolución espacial de 2.5 m en pancromático y 10 m para las multiespectrales. Su ancho de barrido es de 70 km y su frecuencia temporal es de dos días.



Figura 115: Satélite ALOS.

En la actualidad ya no está operativo. Para un futuro próximo, JAXA tiene previsto sustituir ALOS-1 por el satélite ALOS-2 (previsto lanzamiento 2013) que es un sensor SAR y ALOS-3 (previsto lanzamiento 2015) que es un sensor óptico, para ofrecer productos de imagen con un metro de resolución y modelos digitales con tres metros de resolución. La resolución temporal prevista será de 14 días.

### i) CARTOSAT

Satélite de la agencia espacial india (ISRO) lanzado en 2005. Está equipado con dos cámaras para registrar imágenes pancromáticas estereoscópicas con una resolución espacial de 2.5 m y un ancho de barrido de 30 km. Su resolución temporal es de cinco días.

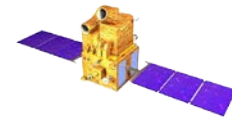


Figura 116: Satélite CARTOSAT-1.

La misma agencia dispone de otros satélites de la familia CARTOSAT-2 que toman imágenes pancromáticas sin estereoscopía con una precisión de un metro y un ancho de barrido de 9.6 km.

### j) FORMOSAT-2

Satélite de la agencia espacial taiwanesa (NSPO) fabricado por Astrium lanzado en 2004 que permite registrar imágenes pancromáticas con una resolución espacial de 2 m e imágenes multiespectrales con una resolución de 8 m. Tiene una resolución temporal de 24 horas y un ancho de barrido de 24 km.

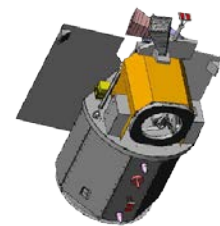


Figura 117: Satélite FORMOSAT-2.

## 2.5.2.2. Media resolución

### a) RapidEye

Este satélite fue lanzado en 2008 y tiene una resolución espacial de 6.5 m en imágenes separadas en cinco bandas. Su resolución temporal es de 24 horas y una superficie cubierta de 4 millones de km<sup>2</sup> diarios.

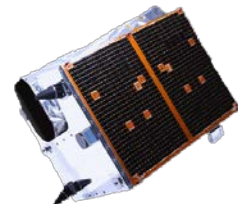


Figura 118: Satélite RapidEye.

### b) ASTER

ASTER forma parte de un proyecto de cooperación entre el gobierno de Japón y la NASA. ASTER es el sensor incorporado al satélite Terra, lanzado en 1999, que junto a otros sensores permite la observación de la Tierra y sus elementos como nubes, glaciares, temperatura, uso de suelo, desastres naturales, vegetación, etc. Tiene una resolución espacial máxima de 15 metros. Las imágenes multiespectrales se obtienen en 14 bandas incluyendo infrarrojo cercano, infrarrojo térmico e infrarrojo de onda corta.

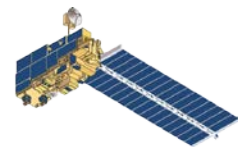


Figura 119: Satélite Terra.



### c) CBERS-2

Este satélite es el resultado de la colaboración de los gobiernos de China y Brasil y fue lanzado en 2003. Permite obtener imágenes multiespectrales con una resolución espacial máxima de 20 m. Tiene una resolución temporal de 26 días. Está previsto lanzar la segunda generación de estos satélites (CBERS-3) en mayo de 2013 que mejorará a 5 m de resolución espacial en pancromático y 10 m en multiespectral.

### d) LANDSAT

LANDSAT 7 es el último satélite de un proyecto que comenzó en 1972 y que pertenece la NASA y el USGS. Equipa dos sensores: ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) y TM (*Thematic Mapper*). El primero permite registrar en ocho bandas y el segundo en siete. La resolución espacial de este satélite es de 15 m para el pancromático y 30 m para las imágenes multiespectrales. Tiene una resolución temporal de 16 días.

## 2.5.3. Sensores activos

Los sensores activos son, fundamentalmente, sensores basados en la emisión de ondas en el espectro no visible para la recogida de información procedente de los objetos sobre los que reflejan dichas ondas. El uso de ondas electromagnéticas permite detectar objetos más allá del rango de otro tipo de emisiones (luz visible, sonido, etc.). Además, es un método indirecto, puesto que no mide directamente distancias.

El sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles como aviones, barcos, vehículos motorizados, formaciones meteorológicas y el propio terreno, se denomina Radar (*Radio Detection And Ranging*). Su funcionamiento se basa en emitir un pulso de radio, que se refleja en el objetivo y se recibe, normalmente, en la misma posición del emisor. A partir de este “eco” se puede extraer gran cantidad de información.

La plataforma que transporta el sensor radar puede ser un satélite o bien un avión especialmente adaptado. Sin embargo, las misiones satelitales tienen, en general, mayor cobertura temporal y una mayor estabilidad en la trayectoria. Tienen un ancho de barrido entre 100 y 500 km con una resolución de 20 m.

Un radiómetro de microondas ofrece una buena resolución espacial y multiespectral y no está influenciado por la presencia de nubes o de la iluminación solar, como les ocurre a los sensores ópticos. Sin embargo, es casi imposible alcanzar las precisiones de un sensor óptico. Además, para un mismo GSD, objetos identificados en una imagen de sensor óptico no se pueden identificar en una imagen radar. La limitada medida en la difracción angular de una apertura, y su consecuente resolución espacial, es directamente proporcional a la longitud de onda e inversamente proporcional a las dimensiones de la apertura. Desde un

satélite, se pueden conseguir unas pocas decenas de metros de resolución en el rango del visible y del infrarrojo con una apertura de unas decenas de centímetros. Cuando la longitud de onda se incrementa desde el visible a las microondas (de micras a centímetros), la resolución disminuye de manera apreciable a no ser que la apertura de la antena se incremente en un valor equivalente (McCandless & Jackson, 2013). Para alcanzar la misma precisión con microondas, se necesitaría dimensiones de antena de decenas de kilómetros.

Tanto los instrumentos de microondas activos como pasivos tienen este problema de resolución. Utilizando una configuración de un solo paso, en la cual se utilizan dos antenas físicas para recibir los ecos radar, las precisiones de las observaciones altimétricas son del orden de seis metros para sensores espaciales, lo cual es equivalente a técnicas ópticas (Hanssen, 2002).

Con la resolución alcanzada por algunos sensores no se puede realizar cartografía, pero pueden ser utilizados para generar un MDT de gran utilidad. Con este objetivo se han utilizado los sensores ERS-1 y ERS-2, así como el SRTM.

A pesar de ello, la aplicación más importante de la interferometría radar es la observación de procesos dinámicos, utilizando una configuración de paso repetido. Es decir, se toman dos imágenes radar mediante una sola antena, volviendo a registrar la zona después de un intervalo de tiempo. Se puede observar la deformación de la superficie de la Tierra como una fracción de la longitud de onda radar, resultando una precisión de orden sub-centimétrica.

A continuación, se relacionan las principales características de las técnicas de teledetección que permiten registrar tridimensionalmente la Tierra: radar, radar de apertura sintética (SAR) e interferometría SAR (InSAR).

Tabla 8: Características de los sistemas SAR terrestres.

Satélite	País	Año	Banda	P1 (m)	P2 (m)	Ancho (km)
ERS-1/2	U.E.	1991/95	C	9.7	25	100
ALMAZ	Rusia	1991	S	15	25	20
JERS-1	Japón	1992	L	10	30	75
SIR-C	EE.UU.	1994	L	13	30	40-90
			X	10	20	
RADARSAT-1	Canadá	1995	C	5	4	50-500
SRTM	EE.UU., Alemania, Italia	2000	C	7.5	15	225
		2000	X	18.7	8	45
ENVISAT	U.E.	2002	C	16.6	6	100-405
TerraSAR-X	Alemania	2007	X	1	2	5
TanDEM-X	Alemania	2010	X	0.48	0.29	6
ALOS, PALSAR	Japón	2006	L	7		40-70

Satélite	País	Año	Banda	P1 (m)	P2 (m)	Ancho (km)
RADARSAT-2	Canadá	2005	C	3	3	20
RISAT-2	India	2008	X	1	1	100
COSMO-SkyMed	Italia	2007	X	0.89	1	10
P1: Precisión en la distancia medida			P2: Precisión en la distancia ortogonal			

### 2.5.3.1. Radar

El término radar se refiere tanto a la técnica como al instrumento. El instrumento emite pulsos en el rango de las microondas y de la radio detectando reflexiones de dichos pulsos sobre objetos. La técnica utiliza el tiempo que ha empleado el pulso en ir y volver para calcular la distancia al objeto que reflejó y la intensidad para determinar el tamaño y rugosidad de la superficie. Un radar mono-estático utiliza una sola antena para emitir y recibir mientras que un radar bi-estático utiliza una antena para emitir y otra para recibir.

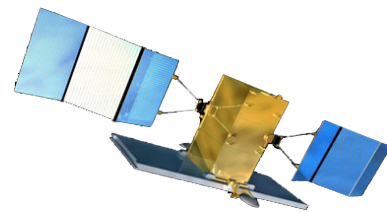


Figura 120: Satélite radar.

El primer sistema radar se remonta a principios del siglo XX para seguimiento de barcos y evitar colisiones, mejorándose su desarrollo por objetivos militares en el transcurso de las dos guerras mundiales. En el campo civil, el radar significó un importante avance para el estudio de cuerpos celestes (la Luna, el Sol y otros planetas).

Actualmente y gracias a la posibilidad de penetrar nubes y a no precisar la luz solar para el registro, permiten al radar ser de gran utilidad en predicciones meteorológicas (se pueden comparar datos diurnos y nocturnos), gestión de cubiertas vegetales, hidrología, desastres naturales, entre otras.

La técnica de observación radar permite la extracción de parámetros físicos y biofísicos de las cubiertas terrestres, suministrando de esta forma un medio para incrementar los conocimientos sobre los entornos naturales (Molina, 2010). Entre los parámetros que más influyen sobre la reflexividad (difusión) de la señal radar, destacan:

- Rugosidad del terreno: El concepto de rugosidad está estrechamente vinculado a la longitud de onda y el ángulo de incidencia del sistema de observación, de tal forma que una superficie se considera rugosa si su estructura tiene dimensiones comparables con la longitud de onda incidente. Así pues, para una determinada rugosidad del terreno, un sistema radar será más o menos sensible a este efecto en función de la frecuencia de observación de este último.

- La humedad del suelo y de la vegetación: Un cambio en el contenido de humedad provoca generalmente un cambio significativo en las propiedades dieléctricas, por lo que a mayor humedad, se incrementa la respuesta.
- La constitución y geometría de los objetos y/o de las cubiertas terrestres: Cada tipología de cubierta provoca mecanismos de difusión diferentes, es decir, las superficies planas producirán reflexiones especulares, mientras que en el caso de edificios o bloques aislados producirán las denominadas reflexiones dobles. En el caso de masas de vegetación se favorece el denominado mecanismo de difusión volumétrica.

La caracterización de los parámetros de las cubiertas terrestres depende de las propiedades de observación de los sensores radar. Entre las propiedades más destacables son la frecuencia del sistema, el ángulo de incidencia o la polarización.

Los objetos tienen la propiedad de responder de forma distinta a la polarización con la que se les observa. Normalmente, tanto para transmisión como recepción de la señal, se dan cuatro tipos de polarizaciones: HH, HV, VH y VV, siendo H horizontal y V vertical.

En un sistema radar, la potencia recibida también es función de la longitud de onda o frecuencia del sistema, de tal manera que la frecuencia de la onda incidente (más otros parámetros como la humedad) determina también la profundidad de penetración sobre la superficie o cubierta observada. De hecho, a mayor longitud de onda, mayor penetración, pero menor precisión altimétrica. Los radares suelen trabajar fundamentalmente con frecuencias específicas denominadas por letras.

Tabla 9: Bandas de los sistemas radar.

Banda	Longitud de onda	Frecuencia	Ámbito de aplicación
X	2.4 – 3.8 cm	8 – 12.5 GHz	Aplicaciones cartográficas en general. Meteorología de muy corto alcance.
C	3.8 – 7.5 cm	4 – 8 GHz	Discriminación de cubiertas terrestres. Meteorología de corto alcance.
S	7.5 – 10 cm	2 – 4 GHz	Vigilancia meteorológica de corto y largo alcance.
L	10 – 30 cm	1 – 2 GHz	Discriminación de cubiertas terrestres. Estudio de turbulencias atmosféricas.
P	75 – 133 cm	225 – 400 MHz	Aplicaciones agrícolas, forestales y geológicas.

Por tanto, el radar cubre un área transmitiendo pulsos de energía microondas que son reflejados y recibidos nuevamente por el sensor. Mediante la medida precisa de la diferencia de tiempo entre el pulso transmitido y el recibido, se puede determinar la distancia al objeto que reflejó (*range* en inglés). La resolución del radar es, en definitiva, su capacidad de distinguir dos objetos separados una distancia mínima. Si no superan la distancia, el radar registrará la combinación de la energía reflejada por ambos.

La precisión en la distancia medida no depende de la propia distancia o la longitud de onda, sino del ancho de pulso procesado ( $\tau$ ) multiplicado con la velocidad de la luz ( $c$ ). Esta precisión también podría ser expresada como el recíproco del ancho de pulso procesado (ancho de banda del pulso  $\beta$ ) multiplicado por la velocidad de la luz:

$$\text{Precisión en distancia} = \frac{c \cdot \tau}{2} = \frac{c}{2 \cdot \beta}$$

Para que la resolución mejore, se debe ampliar el ancho de banda del pulso. Los radares modernos varían la frecuencia del pulso linealmente sobre un rango de frecuencia determinado basado en las capacidades del sensor (potencia de pulso y frecuencia) y de las necesidades de precisión.

Sin embargo, la precisión en la perpendicular a la distancia medida en los sensores Radar de Apertura Real (RAR) depende de su apertura. Es decir, es función directa de la longitud de onda radar ( $\lambda$ ) y de la distancia al objeto ( $D$ ) e inversa de las dimensiones de la antena ( $R$ ):

$$\text{Precisión en distancia perpendicular proporcional a } \frac{\lambda \cdot D}{R}$$

Esta circunstancia es el verdadero problema de este tipo de sensores que puede ser mejorado aumentando la frecuencia, aumentando el tamaño o reduciendo la distancia al objeto, aunque ninguna de las opciones sean muy efectivas desde el espacio.

### 2.5.3.2. SAR

Una clase específica de radar son los denominados “radar de imagen”, entre los que se incluye el Radar de Apertura Sintética (SAR). Su geometría permite tener mayor sensibilidad en la medida de distancias eliminando reflexiones ambiguas.

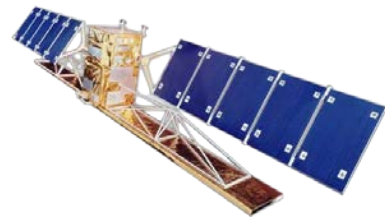


Figura 121: Satélite SAR.

Como se ha visto anteriormente, se requieren antenas grandes para tener una buena resolución. Sin embargo, el SAR lo resuelve simulando una antena mayor mediante la combinación de la información capturada en diversos puntos a lo largo de la órbita. Mediante algoritmos se busca combinar la información obtenida en varios barridos de la antena para recrear un solo “barrido virtual”. Al final, el sistema radar proporciona el mismo rendimiento que daría si estuviese equipado con una antena mucho más grande que la que dispone en realidad.

El concepto básico del funcionamiento del SAR se fundamenta en el efecto Doppler. De hecho, el factor limitante de la antena de microondas (pobre resolución espacial resultante de una gran anchura del haz o campo de vista angular) puede convertirse en una

ventaja para que un radar tenga la capacidad de medir la fase y el efecto Doppler de forma precisa.

Debido a los fenómenos de difracción, para obtener un haz de radiación estrecho se necesitaría una antena muy grande. Para evitarlo, el sistema se configura de tal manera que el pulso sea ancho en la dirección vertical. Si el terreno es aproximadamente plano, el tiempo que tardan en llegar los diferentes ecos (desde décimas de segundo a segundos según la velocidad del satélite) permite distinguir puntos del terreno situados a diferentes distancias en la línea de trayectoria. Distinguir puntos a lo largo de la trayectoria resulta complejo con una antena pequeña. Sin embargo, durante este tiempo, el radar recoge medidas de fase y del efecto Doppler que, a través de un procesamiento de la señal, permite construir o “sintetizar” una apertura equivalente a la distancia que la antena física se mueve mientras el objeto permanece en el haz. Esta apertura sintetizada, la cual puede ser varias veces más grande que la antena receptora/emisora, permite generar imágenes radar con pocos metros de resolución.

En resumen, una antena pequeña emite una serie de pulsos consecutivos, recibe una serie de ecos y los combina de modo que parezca que es una sola observación (simultánea) de una antena grande. Se ha creado una “apertura sintética” mucho más grande que la longitud real de la antena.

Sin embargo, combinar las series de observaciones es computacionalmente muy costoso. Normalmente, no se hace a bordo del avión o satélite, sino que las observaciones se envían a estaciones terrestres y allí se combinan usando técnicas basadas en transformadas de Fourier. El resultado es un “mapa de reflexividad radar”. De cada punto del terreno se conoce cómo distorsiona la amplitud y la fase del pulso (la cual se suele desechar). A partir de la información de amplitud se puede extraer gran cantidad de datos sobre la superficie.

El rango de un pulso de un sensor SAR espacial se sitúa entre 10 y 40 MHz, lo que significa una precisión en la medida de la distancia entre 3.7 y 15 m.

Inicialmente, su utilización se limitaba a casos en los que el radar estaba en movimiento y los blancos relativamente inmóviles (aviones). Pero también se ha utilizado en aplicaciones de teledetección y en cartografía. Las siguientes figuras muestran una comparación de imágenes del océano registradas con diferentes sensores (McCandless & Jackson, 2013). En la imagen óptica, se ven las playas de color blanco y alguna información a cierta profundidad. En la imagen SAR, las playas aparecen de color negro y se aprecia la topografía del fondo marino con mayor definición. Por ello, el radar es muy útil para observaciones de masas de agua o de hielos.



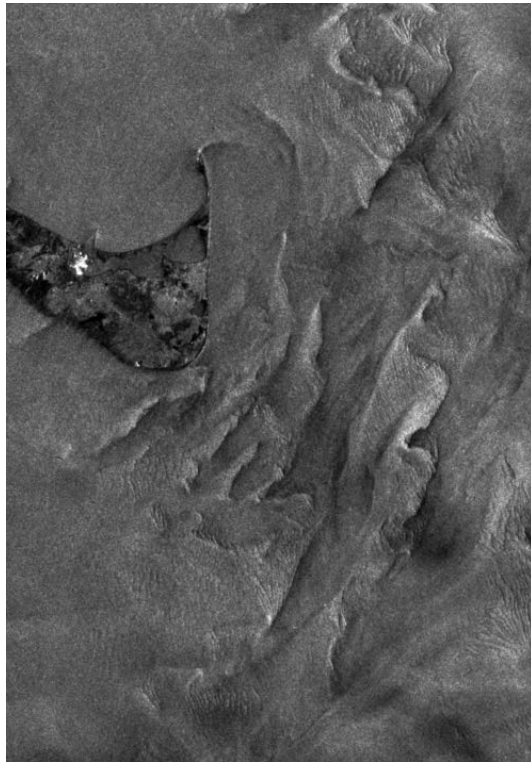


Figura 122: Imagen SAR. Se aprecia el fondo marino, corrientes y olas.



Figura 123: Imagen óptica. Se aprecian bancos de arena y olas internas.

El diseño básico del sistema SAR puede mejorarse de varias maneras para recoger más información, aunque pueden necesitar antenas o procesamiento adicional. Estas mejoras se han conseguido con InSAR o POLSAR.

### 2.5.3.3. InSAR

A la hora de combinar las observaciones realizadas, en vez de desechar los datos de fase, pueden utilizarse para extraer más información. Si están disponibles dos observaciones de la misma zona, puede sintetizarse la apertura para obtener una resolución similar a la que podría obtenerse con un sistema de radar con dimensiones iguales a la separación de las dos mediciones. Esta técnica se llama interferometría SAR o InSAR (InSAR Working Group, 2004).

Estas dos observaciones pueden haberse obtenido simultáneamente porque se dispone de dos antenas equipadas en el satélite o haberse obtenido en dos pasadas diferentes por la misma zona. Si las dos muestras se obtienen simultáneamente, cualquier diferencia de fase contendrá información acerca del ángulo de dónde reflejó la señal que, combinándola con la información de la distancia, permite determinar la posición en tres dimensiones, produciendo un MDT en una única pasada. El MDT generado con InSAR consta de una rejilla regular con las cotas interpoladas y un modelo con el error estadístico a priori. Las



precisiones oscilan entre 1 y 16 m, dependiendo de la banda utilizada. Cuando más corta sea la longitud de onda, más precisa es la medida.

Si las dos muestras están desplazadas temporalmente, existen dos posibles fuentes de desfase: la altitud del terreno o el movimiento del terreno. El desfase necesario para causar una diferencia de fase significativa es del orden de la longitud de onda usada, es decir, que se podrían detectar cambios en el terreno de orden centimétrico. Sin embargo, para ello se necesitaría un MDT que permita separar las dos fuentes de desfase, por lo que podría ser necesaria una tercera pasada para generar uno. Este método ofrece una poderosa herramienta en geología y en geografía. Por ejemplo, se pueden cartografiar los movimientos glaciares con dos pasadas, el avance de una erupción volcánica, desprendimientos de tierras o monitorización de infraestructuras.

También se puede mejorar la precisión del MDT, utilizando InSAR aerotransportado, cuya altura de vuelo es menor. Sin embargo, la precisión no mejora de manera sustancial, ya que la precisión del InSAR no depende linealmente de la altura de vuelo. Además, su coste no justifica su uso.

Las ventajas del InSAR son la gran cobertura, la independencia de las condiciones atmosféricas, los cortos tiempos de adquisición y la amplia cobertura temporal. Como desventajas hay que mencionar la limitación en cuanto a precisión altimétrica, la falta de datos en zonas de sombra o de vegetación densa y que en las áreas de baja coherencia aumenta el error. Por otro lado, en determinados casos, se debe georreferenciar el MDT, corrigiendo los posibles errores sistemáticos (Dana, et al., 2009).

Tiene una variante terrestre denominada TInSAR, que utiliza el mismo fundamento pero con una antena moviéndose por raíles midiendo sobre el objeto a monitorizar. Las precisiones obtenidas pueden alcanzar valores inferiores al milímetro.

#### 2.5.3.4. POLSAR

La polarimetría radar (POLSAR) tiene por objeto medir los parámetros característicos de un difusor a partir de su comportamiento polarimétrico. La utilización de estos datos permite una mejor caracterización de las interacciones de una onda electromagnética en un medio natural, dado que la difusión de una onda está vinculada a las propiedades geométricas, físicas y biofísicas del medio (Lee & Pottier, 2009).

La disciplina que estudia la polarización de las ondas se conoce como Polarimetría, y se ubica originalmente en el campo de la óptica física. Esta ciencia trata con la naturaleza vectorial de las ondas electromagnéticas polarizadas a través del espectro de frecuencias. Cuando existen cambios graduales en un medio físico (índice de refracción, permitividad, permeabilidad o conductividad), el estado de polarización de una onda mono-frecuencia se transforma y se dice que la onda vuelve a polarizarse y/o despolarizarse. Cuando una onda incide sobre un objeto, la parte de esta última que es reflejada o difundida contiene una información valiosa acerca de la naturaleza de este último y según sea la dirección del vector campo eléctrico con respecto al eje de propagación se tendrán unas determinadas

interacciones entre la onda y el objeto. Emitiendo varias polarizaciones y utilizando antenas receptoras con una polarización específica, se pueden generar imágenes diferentes de una misma serie de pulsos.



Figura 124: Imagen TerraSAR-X (3 m, polarizaciones VV, HH, VV+HH), donde la combinación de diferentes polarizaciones realza la diferencia de distintas clases de vegetación.

Además, los nuevos desarrollos incluyen la utilización de los cambios en los retornos de polarización de algunas superficies (pasto o arena), entre dos imágenes de la misma locación en diferentes momentos para determinar si hay cambios no visibles a sistemas ópticos.

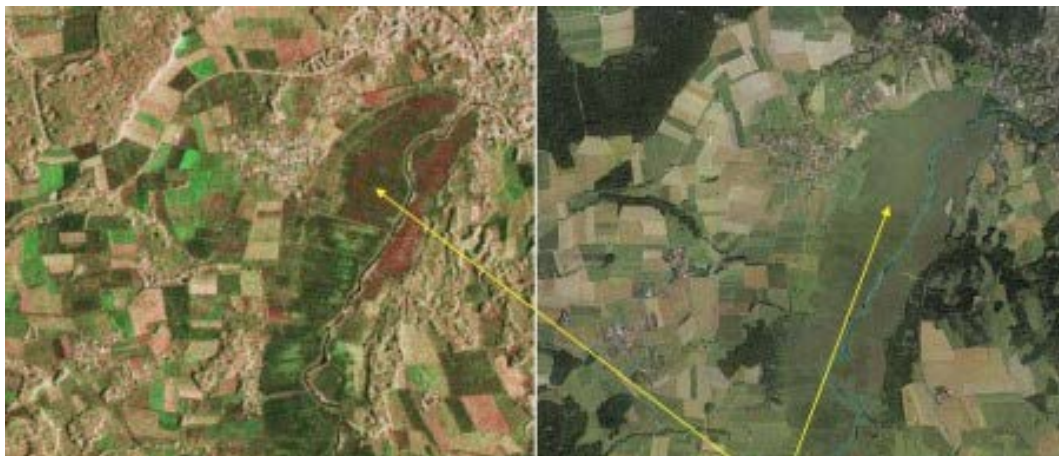


Figura 125: En la izquierda se muestra una imagen TerraSAR-X (3 m, polarizaciones VV, HH, VV+HH) y a la derecha una imagen de sensor óptico donde no se notan las diferencias.

Hasta hace poco, los sistemas que operan en modo mono-polarización como el ERS, JRS, RADARSAT-1 y otros, tenían capacidades limitadas para captar las distintas propiedades de las cubiertas terrestres. Así pues, los radares multi-frecuencia y/o multi-polarización como ENVISAT, ALOS y RADARSAT-2 entre otros, son herramientas

capaces de suministrar información más detallada sobre las variables físicas y biofísicas de entornos naturales.

### 2.5.3.5. Misiones y programas

#### a) ERS

En 1991, la ESA lanzó el satélite ERS-1 que llevaba un sensor SAR, un altímetro radar y otros instrumentos para la medición de datos de las masas de agua. Posteriormente, en 1995 lanzó el ERS-2, que además llevaba sensores para la medición de la capa de ozono. Durante nueve meses, por primera vez, ambos satélites trabajaron en tándem permitiendo obtener modelos digitales del terreno, datos sobre los océanos y capas de hielo, monitorización de desastres naturales, así como mapas de cambios en un corto espacio de tiempo, ya que ambos satélites orbitaban con una diferencia de 24 horas. En 2000, ERS-1 dejó de operar y ERS-2 continuó operando hasta que, en 2002, se unió a Envisat para trabajar de manera conjunta. Finalmente, a mediados de 2011, ERS-2 también fue retirado. Ambos satélites emitían en la banda C.

#### b) Envisat

Este satélite se diseñó para la observación de la Tierra en órbita polar, lo que ha proporcionado medidas de la atmósfera, océanos, tierra y hielo durante los últimos diez años (su misión terminó en Mayo de 2012) y que ha permitido realizar controles a largo plazo de los cambios climáticos y ambientales en la Tierra. Incorporaba un radar de imagen, un altímetro radar y un radiómetro para medir la temperatura, entre otros siete instrumentos de medida. Además, llevaba incorporado un espectrómetro de media resolución sensible a los cambios de coloración en el océano y la tierra. Será remplazado por la misión Sentinel.

#### c) RADARSAT

Familia de satélites SAR canadienses que emiten en la banda C. En 2005, fue lanzado el segundo modelo, RADARSAT-2, uniéndose al primer modelo lanzado en 1995. Existe gran similitud entre los parámetros que definen a ambos satélites (órbitas o calibración de los datos) por lo que se puede recoger información indistintamente y compararla para programas de detección de cambios. Además, RADARSAT-2 permite escoger la polarización, además de tener mejor resolución espacial de hasta 3 m. Por otro lado, se ha reducido el tiempo de espera de una imagen hasta cuatro horas, por lo que puede ser utilizado para casos de urgencia.

#### d) ALOS

Como se mencionó en el apartado 2.5.2.1, este satélite de la JAXA incorpora un sensor PALSAR midiendo en la banda L, que permite registrar datos con condiciones climatológicas adversas con una precisión de 10 m. Tiene cuatro modos diferentes de operar con polarizaciones distintas. En el modo fino permite registrar con 7 metros de resolución espacial. El ancho de barrido está entre 40 y 70 km. Ya no está operativo y será sustituido en 2013 por el satélite ALOS-2.

#### e) TerraSAR-X

Este satélite también denominado TerraSAR-X1 ha sido desarrollado entre DLR y Astrium. Tiene una geometría de vista lateral opuesto a la vista de perspectiva central de un sistema óptico. A partir de los datos adquiridos, ofrece tres tipos diferentes de productos. Uno de ellos es una imagen de alta resolución y polarización simple de un metro de resolución (Kugler, et al., 2011). Es el primer satélite de una misión que se ha visto ampliada con TanDEM-X y que, en el futuro, se verá complementada con los satélites TerraSAR-X2 (2015) y HRWS (2019).

#### f) TanDEM-X

Satélite lanzado a mediados de 2010, que trabajando en tándem con TerraSAR-X forma un interferómetro radar de alta precisión para la obtención de MDT de toda la Tierra. Estos datos estarán disponibles a partir de 2014. Este MDT tendrá una precisión relativa vertical de 2 m y una precisión absoluta de 10 m, formando una rejilla de celdas cuadradas de 12 m de lado. La precisión será mayor que la de cualquier modelo de elevación por satélite disponible hoy en día y remplazará al SRTM. Los datos de ambos satélites son tratados y comercializados por Infoterra (Weber, et al., 2006).

Los dos satélites funcionan en un modo llamado bi-estático y vuelan a una distancia mínima de sólo 200 m el uno del otro, por lo se pueden grabar imágenes de la misma zona desde perspectivas ligeramente diferentes, pudiendo calcular la altimetría de forma precisa.

#### g) COSMO-SkyMed

Constelación de cuatro satélites SAR pertenecientes a la ASI (Agencia Espacial Italiana) que tiene como objetivo la observación de la Tierra con fines militares y civiles. Tiene varios modos de operación con polarizaciones seleccionables y con resoluciones que van desde 1 m a 100 m.



Bloque II

# MATERIALES Y MÉTODOS





### Capítulo 3

# Sistemas de registro basados en técnicas láser

## 3.1. Introducción

Se denomina láser al instrumento capaz de generar ondas de luz usando una estrecha banda del espectro. El nombre deriva del acrónimo en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es decir, amplificación de la luz por emisión inducida de radiación y sus orígenes se remontan a 1960. Su funcionamiento difiere de otros tipos de fuente de luz como las bombillas, que emiten luz con una gran abertura y con un amplio espectro de longitudes de onda. Según su potencia y banda del espectro donde operan, pueden ser utilizados para diversas aplicaciones que varían entre la simple iluminación de un puntero, la lectura de un DVD u operaciones de corte quirúrgico o de materiales industriales.

En los últimos años, el registro mediante láser ha revolucionado el registro cartográfico tanto aéreo como terrestre. El término comúnmente utilizado para el registro mediante láser ha sido LiDAR que es un acrónimo derivado de la denominación en inglés *Light Detection And Ranging*. No obstante, en el ámbito de la Teledetección también se ha utilizado Láser radar (*RAdio Detection And Ranging*) o LADAR cuando el registro de objetos se ha apoyado en el uso de láser.

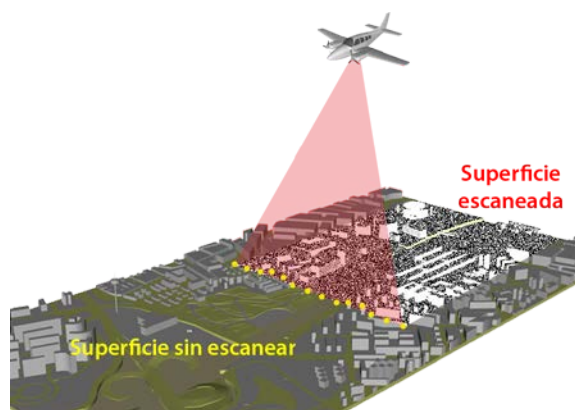


Figura 126: Esquema de registro mediante sensor láser de barrido aerotransportado.

Esta tecnología permite capturar de manera discreta pero a muy alta resolución cualquier elemento en tres dimensiones, de tal manera que el producto generado es una nube de puntos de alta densidad en verdadera magnitud, a partir de la cual se pueden realizar cálculos métricos, obtener dibujos, cortes, perfiles o secciones, vectorizar entidades y

modelar digitalmente los elementos deseados en 2D/3D en un entorno CAD, SIG o BD. De hecho, esta característica es la principal ventaja de esta tecnología.

Básicamente, el sistema LiDAR está compuesto por un sensor activo, desde el cual se envía un haz muy estrecho de alta energía (láser) hacia el objeto que se desea medir, en el que se refleja dicho rayo de manera difusa, siendo captada por el sensor, que lo recibe y lo graba. Para determinar la distancia entre el sensor y el objeto que reflejó, mide el tiempo empleado entre la transmisión y la recepción del pulso. El producto entre el tiempo y la velocidad de la luz láser genera un valor que es el doble de la distancia (ida y vuelta). Para poder calcular las coordenadas del objeto que reflejó el rayo, el sensor también registra la dirección del rayo. La manera de calcular las coordenadas de un punto mediante una medida láser se detalla en el Anexo A, Fundamentos de la medición láser.

El resultado del análisis de los cambios producidos en las propiedades de la luz reflejada permite determinar las propiedades del objeto que reflejó o del medio que atravesó la luz, es decir, además del registro geométrico de los objetos escaneados, también es posible obtener otras características radiométricas de las superficies como la intensidad de luz reflejada o su color, mejorando con ello la información recopilada.

En un principio, los escáneres láser eran de corto alcance y se utilizaban principalmente en el diseño automatizado e industrial para facilitar el Diseño Asistido por Ordenador (CAD). Esto mejoró la producción en masa de artículos de consumo.

Posteriormente, los sensores ampliaron el alcance y permitieron el registro en otros campos, como la generación de la información geométrica tridimensional de plantas industriales. Hasta la llegada de los sensores de registro láser, la información geométrica utilizada de estos objetos se limitaba a planos en dos dimensiones, debido a la complejidad que planteaban. Por tanto, se mejoró en el mantenimiento, conservación y productividad de industrias como la petroquímica o la eléctrica. Actualmente, su utilización se ha ampliado a otras disciplinas como la documentación del patrimonio, la arquitectura, la medicina forense o, incluso, la industria del entretenimiento.

Al aumentar el alcance y potencia de los sensores, también ha sido posible instalarlo en dispositivos aerotransportados, permitiendo el registro cartográfico como complemento o, a veces, sustitución de la fotogrametría aérea. Otro ámbito de utilización de los sensores de largo alcance está en el registro de paisajes desde tierra, colocando el sensor en lugares elevados y sin necesidad de ser aerotransportados.

En el ámbito de la teledetección, las aplicaciones genéricas de los láseres permiten desde aplicaciones medioambientales (control de polución, composición atmósfera, detección de contaminantes específicos) hasta la generación de modelos de elevaciones. Para poder medir desde estas distancias, los láseres deben emitir con una gran potencia, con una corta duración, con un ancho de banda estrecho y con una baja divergencia.

Cada día los sensores son más potentes y compactos. De hecho, la tecnología ha llegado a un punto donde el coste de este tipo de sensores se ha reducido, pudiendo instalar

dispositivos de bajo coste y relativa buena precisión en vehículos aéreos sin tripulante o en artículos complementarios de entretenimiento como videoconsolas.

Por tanto, se trata de un método directo y activo de captura de datos. Por ser activo puede trabajar de día y noche (incluso mejor por la noche debido a la no interferencia solar), puesto que no precisa de energías externas adicionales como puede ocurrir en fotogrametría. Igualmente, también se podrá medir en las zonas sin textura como pueden ser zonas de sombra. Por otro lado, la mayoría de los LiDAR trabajan en el infrarrojo cercano (NIR), por lo que se ven influenciados por las nubes, nieve, lluvia, etc., es decir, no son independientes de la meteorología como podrían ser los sensores radar.

## 3.2. Antecedentes

El primer láser óptico fue desarrollado en la década de los sesenta en EE.UU. Se realizaron mediciones láser a la Luna desde satélite, así como investigación atmosférica y oceanográfica. En esta década también se probó el primer láser aerotransportado, el ATM (*Airborne Topographic Mapper*) de la NASA, desarrollándose en la década de los setenta también para aplicaciones batimétricas, mediante el AOL (*Atmospheric Oceanographic LiDAR*). En estos años, esta tecnología estaba en desarrollo e investigación y los instrumentos eran demasiado costosos, además de la falta de disponibilidad de sistemas de posicionamiento GNSS/INS fiables.

Con la aparición del GPS en los ochenta y la desclasificación de sistemas inerciales utilizados en el ámbito militar, se pudieron utilizar perfilómetros con mayores precisiones, aunque estos fueron sustituidos por escáneres (ALS) que montaban dispositivos GPS e INS, en la década de los noventa. En 1996, sólo había una empresa que vendiera ALS y pocos proveedores de datos, pero tres años después ya había varios constructores y alrededor de cuarenta proveedores de datos. En esta década, un sensor LiDAR podía registrar entre 2000 y 25000 pulsos por segundo y proporcionaba una densa nube de puntos que no podía generarse desde la topografía o la fotogrametría clásica. En este momento, la comunidad geomática se interesa por estos dispositivos esperando incluso la extracción de entidades como edificios, carreteras o zonas boscosas.

Hay que resaltar que, a principios del siglo XXI, los datos de gran resolución eran registrados utilizando fotogrametría y los datos de baja resolución eran registrados mediante datos radar o imágenes estereoscópicas tomadas desde satélites. Para poder registrar mediante fotogrametría, se necesitan ver los objetos en una imagen. El radar, a pesar de sus excelentes propiedades de área cubierta y penetrar las nubes, resulta caro, tiene problemas para determinar la posición en zonas escarpadas o ciudades y precisa expertos operadores para su tratamiento y procesamiento. La cobertura LiDAR es similar a la obtenida en fotogrametría pero tiene la capacidad de poder atravesar la cobertura vegetal para medir el suelo, donde los operadores de fotogrametría no pueden medir, generando datos con mayor densidad que en fotogrametría. Por tanto, el LiDAR se convirtió en una alternativa óptima por ser un método rápido, preciso y directo para obtener datos 3D.

Sin embargo, en esa época todavía existía una limitación en el tratamiento de los datos, tanto por la velocidad de los ordenadores como por la ausencia de software que procesara la información. En este momento, los sensores registraban 50 mil puntos por segundo, los sensores de posicionamiento GNSS/INS eran más precisos y se registraba la intensidad. Además, empezaron a surgir aplicaciones de tratamiento y los ordenadores mejoraron en prestaciones y almacenamiento.

Con el aumento de la demanda de datos LiDAR, las asociaciones y organismos de fotogrametría y teledetección desarrollaron normativas para asegurar la calidad de los procesos. La ASPRS publicó el formato LAS, que hoy en día, se ha convertido en un estándar para la transferencia de este tipo de información.

Actualmente, existen más de 200 sistemas LiDAR operando mundialmente. Los sistemas son capaces de registrar hasta medio millón de puntos por segundo, pudiendo enviar varios pulsos al mismo tiempo y procesando varios retornos del pulso para restituir la forma del objeto que reflejó. Además, incluyen cámaras ópticas de medio formato para añadir información complementaria en el espectro visible a cada punto medido.

Existen diferentes sensores con características propias que permiten ser utilizados en un rango de altitudes desde 80 a 5000 m. Incluso existe un sensor LiDAR de alta potencia operado por la NASA que permite volar a diez metros y que se denomina LVIS (*Laser Vegetation Imaging Sensor*) destinado al estudio de la topografía, hidrología y vegetación.

En el ámbito de la batimetría, se han desarrollado sistemas que permiten registrar información del fondo acuático hasta 80 m de profundidad y de zonas emergidas como costas, playas, etc.

Los sensores LiDAR también se han desarrollado en aplicaciones terrestres o de objeto cercano, con una amplia oferta de posibilidades que permiten registrar objetos con precisión milimétrica a una velocidad de más de un millón de puntos. La velocidad de procesamiento ha permitido la construcción de sistemas para incorporarlos en vehículos en movimiento (MMS) mejorando el registro de entidades situadas en infraestructuras lineales. Además, la mejora de la tecnología ha permitido reducir el tamaño y peso de los dispositivos (tanto LiDAR, como sensores de posicionamiento y cámaras) por lo que se han podido instalar sobre pequeños vehículos autónomos aerotransportados (UAV), permitiendo el registro de zonas poco accesibles o peligrosas.

A continuación, se analiza en detalle esta nueva tecnología diferenciando entre láser aerotransportado y láser terrestre.

## 3.3. LiDAR aerotransportado

### 3.3.1. Introducción

En los últimos años el Láser Escáner Aerotransportado (ALS) ha adquirido notable significación como una técnica geomática de alta productividad y precisión. Esencialmente, la tecnología se basa en un sensor láser sobre una plataforma móvil (helicóptero o avión) que cubre el área de trabajo. Las posibles aplicaciones en las cuales se ha comprobado su utilidad, junto con su precisión y resolución, son su punto fuerte ante la competencia con otras técnicas (Fotogrametría – Teledetección). La línea actual de desarrollo, sin embargo, apunta hacia la sinergia con estas tecnologías.

El ALS es la mejor tecnología para obtener Modelos Digitales del Terreno (MDT) de precisión en grandes extensiones de forma automática y ha revolucionado la productividad de estos trabajos. Aunque la tecnología ya se encuentra en un estado de desarrollo maduro, existen áreas en las que se deben mejorar los modos de trabajo. Por ejemplo, el proceso de filtrado/clasificación de puntos y filtrado de errores, aún se encuentran en una fase que requieren un cierto control manual por parte del usuario. De hecho, uno de los objetivos planteados en la presente tesis es la automatización de estos procesos.

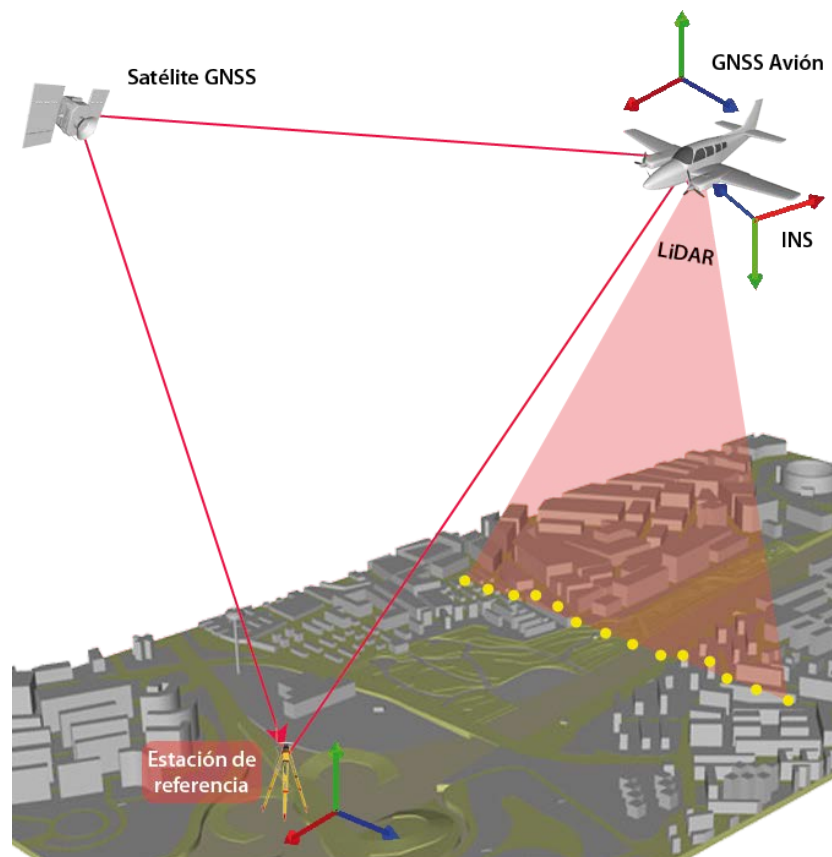


Figura 127: Registro de puntos mediante láser aerotransportado (ALS).

### 3.3.2. Características técnicas

#### 3.3.2.1. Configuración

Esencialmente, un sistema ALS consiste en un sensor láser instalado en una plataforma móvil que barre las superficies que se encuentran entre el sensor y el terreno desnudo, obteniendo una nube de puntos de coordenadas precisas. Sin embargo, el sistema descrito es más complejo y precisa de más componentes para poder llevar a cabo el proceso de registro.

Básicamente, se compone de un sensor láser, un sistema de navegación inercial y un sistema de posicionamiento global. Todo esto está acompañado por un ordenador a bordo con software apropiado para la navegación y gestión del vuelo, con dispositivos de almacenamiento cuya capacidad permite almacenar enormes cantidades de datos. Además, se incluye un reloj muy preciso que permite sincronizar todos los sensores.

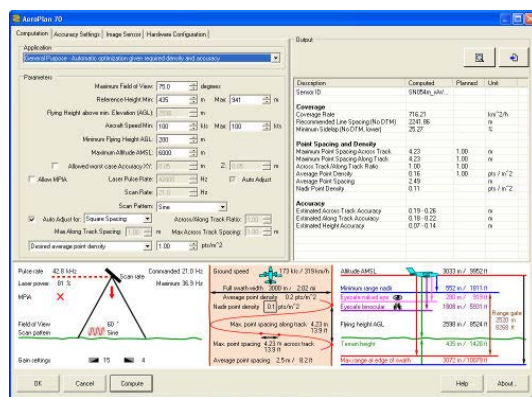


Figura 128: Software Leica FPES para el diseño del plan de vuelo.

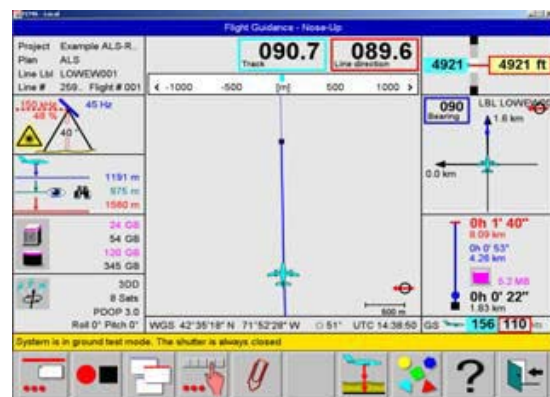


Figura 129: Software Leica FCMS para el control del sistema y pilotaje del avión.

Opcionalmente, se pueden incorporar otros sensores basados en películas (por ejemplo, Leica RC30) o, más habitualmente, óptico-electrónicos de área (por ejemplo, Intergraph DMC-II) o de línea (por ejemplo, Leica ADS80), como muestra la figura 131. Este último tipo de sensores habilitan la generación posterior de ortoimágenes de manera rápida, pues las imágenes son digitales. También se puede equipar con cámaras CCD estándar o de vídeo para documentación, por ejemplo, en aplicaciones de ingeniería civil (carreteras o ferrocarriles), conducciones o líneas eléctricas. Estas imágenes se georreferenciarán junto con el resto de datos y su función primordial es ayudar en la identificación de objetos registrados por el sensor LiDAR. Además, esta información multispectral puede ser incorporada posteriormente a cada punto registrado.



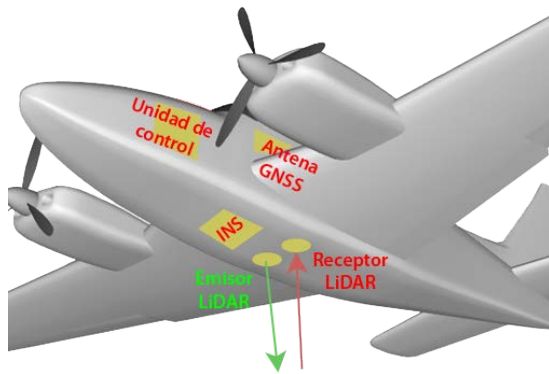


Figura 130: Distribución esquemática de los componentes en el interior del avión.



Figura 131: Sistema LiDAR Leica ALS60 con cámara digital Leica ADS80 (derecha).

Debido al excesivo coste de las cámaras de gran formato, existe la posibilidad de incorporar cámaras de medio formato, cuya precisión y tamaño de imagen se asemeja a la tomada con el sensor LiDAR. Esta opción es cada día más elegida ya que mejora la salida de los datos LiDAR, que radiométricamente son muy pobres. Además, si las cámaras son de medio formato se montan de manera solidaria con el sensor LiDAR y se calibran juntos, mejorando la integración. Estas cámaras se han descrito en el apartado 2.4.1.2.



Figura 132: Leica ALS50 con cámara NexVue.



Figura 133: Leica ALS50 con cámara Trimble DSS.



Figura 134: Optech ALTM con cámara Trimble DSS.

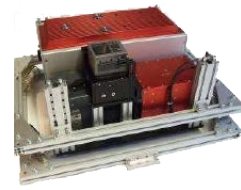


Figura 135: IGI LiteMapper con cámara DigiCAM.

Las plataformas más habituales utilizadas para el transporte son aviones o helicópteros (especialmente para el registro de zonas lineales o áreas pequeñas), vehículos aéreos no tripulados (UAV), etc. Este último tipo de plataformas se detallan en el capítulo 2.4.3.

#### a) Sensor Láser

El sensor láser mide las distancias desde su centro óptico al terreno y, casi siempre, la intensidad, aunque posteriormente rara vez se utiliza. Existe multitud de configuraciones del sensor, empezando por el modo de trabajo del láser empleado, que puede ser de tiempo de vuelo por pulso (TOF) que envía pulsos a intervalos regulares de tiempo o de onda continua (CW) que registran la fase.

Actualmente, los sensores TOF son los más utilizados. La mayoría de los sensores CW se dan en equipos terrestres, aunque existió uno aéreo desarrollado por la Universidad de Stuttgart en 1997 denominado ScaLARS. El funcionamiento de cada uno de estos tipos está explicado en el Anexo A, fundamentos de la medición láser. No obstante, varios autores

han tratado con detalle la medida de distancias con cada sensor, tanto de pulso (Baltsavias, 1999), como de onda continua (Wehr & Lohr, 1999).

Los elementos del sensor láser son el emisor y el receptor. El emisor contiene el láser, la óptica de salida de la señal y el monitor de salida. La óptica de salida de la señal consiste en un mecanismo de desvío del rayo láser (espejo, polígono, etc.) que genera una determinada distribución de puntos sobre el terreno. Los tipos de mecanismos posibles están detallados en el capítulo A.4.4. Diferentes montajes de los sensores de barrido láser. Por su parte, el monitor de salida registra el momento de salida de la señal que, en la mayoría de los sensores, coincide con el 90% de la potencia del pulso.

El sistema receptor consta de un telescopio, un analizador del espectro, un detector y una unidad procesadora de los datos. El telescopio recoge la señal reflejada que pasa al analizador del espectro donde se aíslan las longitudes de onda deseadas para enviárselas al detector. Esta señal filtrada es analizada por el procesador, determinando los retornos. Comparando el tiempo de los retornos con el tiempo de emisión, se puede determinar el tiempo que recorre la señal y, por tanto, la distancia al objeto observado.

Cada sistema registra de manera distinta los retornos. Algunos registran sólo el último pulso, otros los tres primeros y el último, otros sólo el primero y el último, y los más modernos guardan toda la forma del retorno (análisis *full-waveform*, apartado A.6). El cociente de la potencia de pico recibida y la emitida es la reflexividad que es función de la superficie donde se ha reflejado el pulso. Véase el apartado A.4.1.3. Reflexividad o intensidad.

Las dispersiones de energía en cada reflexión dificultan la identificación de cada pulso y, por tanto, el tiempo de llegada. El error de una medida depende de la capacidad de evaluar con precisión el tiempo de recepción/emisión y la relación de señal/ruido (SNR). Su desviación típica es relación inversa del SNR y los valores oscilan normalmente entre 1 cm y 2.25 cm (Baltsavias, 1999).

Por último, habría que considerar la refracción atmosférica, la cual modifica la trayectoria del rayo afectando a la distancia medida. Se puede estimar el coeficiente de refracción en función de la altura de vuelo. Por ejemplo, para un vuelo a 1000 m de altura, la desviación angular del haz láser traducida al terreno es de 10.2 mm, valor poco significativo comparado con otros errores en la posición del punto láser, por lo que puede considerarse despreciable (Walker Morin, 2002).

## b) Sistema de Navegación Inercial

El sensor láser mide las coordenadas de un punto respecto de su propio sistema de referencia. Sin embargo, el sensor está cambiando su posición y orientación debido al movimiento del avión, por lo que para conocer la posición de cada punto en un sistema de referencia único, se necesita un sistema que proporcione estos valores en todo momento, pues la medición de puntos es continua. Este sistema deberá proporcionar los parámetros

de posición y orientación, puesto que el avión se traslada pero también gira. Además, para no perder calidad en las coordenadas del punto medido, se necesita una precisión en estos parámetros similar o mejor que la del escáner láser. Para ello, es necesario utilizar un Sistema de posición y orientación dinámico (POS), consistente en un Sistema de Navegación Inercial (INS) y un receptor GNSS.

El sistema INS permitirá conocer los ángulos de inclinación respecto de un sistema cartesiano con origen en la antena GNSS. Este sistema está compuesto por la unidad de medida inercial (IMU) y el procesador de la navegación y determina los tres movimientos principales: alabeo, cabeceo, y giro ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ). Los tres sistemas de medida (sensor láser, INS y GNSS) son solidarios y deberán estar perfectamente sincronizados. Por tanto, deberán haber sido calibrados previamente para conocer perfectamente las posibles excentricidades y posiciones relativas entre ellos.

Por tanto, el IMU es un componente del INS y es el dispositivo encargado de medir la velocidad y orientación utilizando acelerómetros, giróscopos y, a veces, magnetómetros. Normalmente, incluyen tres elementos de cada uno de ellos, dispuestos en direcciones perpendiculares. Suelen trabajar de manera conjunta con una antena GNSS, permitiendo calcular la posición del vehículo que los transporta (avión, automóvil o barco) cuando éste pierde la señal. Los acelerómetros detectarán un cambio en la aceleración del vehículo y los giróscopos detectarán un cambio en el movimiento de rotación, es decir, en los ángulos. Si el IMU incluye magnetómetros, le permitirán obtener mejores medidas en el cálculo de la orientación dinámica respecto de un sistema de referencia.

Al ser cambios (valores relativos) lo que detecta, el principal problema de los IMU es la acumulación de errores que tienen, ya que el sistema va añadiendo los pequeños cambios detectados respecto de posiciones previas, acumulando pequeños errores de una posición a otra, lo que lleva a una deriva del sistema. Esta deriva crece con el tiempo y puede alcanzar valores de  $0.5^\circ$  por hora. Por ello, es necesario calibrar el sistema periódicamente.

El mejor emplazamiento del IMU es el más cercano posible al sensor láser. Disminuir la distancia entre el origen de la unidad inercial y el sensor láser mejora la calibración del sistema, que consistirá en aplicar determinadas correcciones para alinear los ejes de los distintos elementos. La frecuencia de estos sistemas oscila entre 128 y 500 Hz, siendo más frecuentes valores cercanos a 200 Hz. Los valores típicos de precisión en la medida de los ángulos son de  $0.007^\circ$  para el cabeceo y  $0.003^\circ$  para el alabeo y el giro. En el apartado 9.2.B.5. Sistemas inerciales, se explican brevemente detalles técnicos de los diferentes tipos de IMU, así como de algunos modelos comerciales.

### c) Sistema de Posicionamiento Global

El objetivo de este sistema es determinar la posición de la plataforma. Para alcanzar las máximas precisiones en el avión se sitúa un receptor GNSS de doble frecuencia, mientras que en tierra se establece una red que realiza una observación simultánea con el receptor móvil. Por tanto, se debería trabajar en modo diferencial, aunque no existen reglas fijas para situar el receptor de referencia en tierra. A menudo, las distancias entre el receptor de tierra y el avión se encuentran entre 10 km y 50 km, dependiendo obviamente de la topografía del terreno y las posibles perturbaciones GNSS que puedan existir.

La frecuencia del sistema varía entre 1 Hz (1 punto cada segundo) y 10 Hz, muy inferior a la del láser (miles de puntos por segundo). A una velocidad de 70 m/s, se tendrían los parámetros de orientación externa de un punto cada 70 m. Los sistemas disponibles trabajan en tiempo real RTK y/o en post-proceso (DGPS). Debido a que debe haber comunicación constante entre la antena del avión y el receptor en tierra, trabajar en RTK no siempre es posible, sobre todo en áreas extensas debido a la orografía del terreno y a las limitaciones de distancia que tienen las correcciones enviadas al receptor móvil. Las precisiones pueden llegar a 20 mm  $\pm$  1 ppm en RTK y a 6 mm  $\pm$  0.5 ppm en DGPS para altimetría y a 10 mm  $\pm$  1 ppm en RTK y a 3 mm  $\pm$  0.5 ppm en DGPS para planimetría. Evidentemente, estos modos de trabajo no están libres de efectos cinemáticos, troposféricos o de multi-camino, por lo que, para evitar posibles fallos en la resolución de ambigüedades, se recomienda utilizar más de una estación en tierra, que las líneas base sean inferiores a 20 km, que haya más de cinco satélites y que el GDOP sea inferior a tres.

Se pueden consultar detalles sobre los tipos de posicionamientos y de antenas existentes en el mercado en el apartado 2.3. Técnicas de Posicionamiento Global por Satélite.

### 3.3.2.2. Funcionamiento

#### a) Obtención de la medida

El haz láser emite perpendicularmente al avance del avión y con un determinado ángulo de apertura. Este ángulo se está registrando de forma continua, tomando puntos de la franja del terreno que sobrevuela (figura 136). Esto constituye lo que se llama una pasada. El ancho de la pasada ( $A_p$ ) condicionará el número de pasadas necesarias para cubrir la zona de medición. Su valor depende de la altura de vuelo ( $h$ ) y del ángulo abarcado por el escáner ( $\theta$ ) conocido como FOV (*Field Of View*) del sensor.

$$A_p = 2 \cdot h \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

A su vez, la altura de vuelo máxima depende principalmente de la potencia del sensor y la altura mínima de las regulaciones administrativas y la distancia de seguridad para no dañar la vista.

Por otro lado, el FOV de un ALS es bastante pequeño (unos 20°), mucho menor que los utilizados en sensores ópticos. Esto es debido a limitaciones constructivas en el sistema de desvío de la señal láser en el emisor (ver apartado A.4.4) y a la pérdida de calidad de la medida para ángulos grandes. Tiene la ventaja de que apenas se generan zonas ocultas detrás de los objetos pero tiene el inconveniente de necesitar más pasadas para cubrir una zona, aumentando los costes.

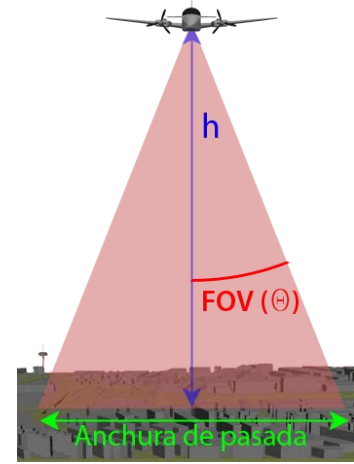


Figura 136: Ángulo abarcado por el LiDAR.

El tamaño de la huella ( $A_L$ ) de un pulso láser sobre el terreno (suponiéndolo llano) dependerá de la altura de vuelo ( $h$ ), del ángulo con respecto a la vertical de ese rayo concreto ( $\theta_{inst}$ ) y del ángulo de divergencia del láser ( $\gamma$ ) también conocido como IFOV (*Instantaneous Field of View*). En el caso ideal es un círculo, aunque en realidad será una elipse o incluso un patrón más irregular (Baltasvias, 1999):

$$A_L = \frac{h}{\cos^2 \theta_{inst}} \cdot \gamma$$

Se requiere un valor bajo de la divergencia del haz y el menor valor alcanzado por los sensores disponibles en el mercado es de 0.25 mrad.

Un parámetro muy importante en una medición es la densidad de puntos que se toman, o bien, el espaciado que existe entre ellos. Dependerá en gran medida del tipo de escáner, de la altura de vuelo ( $h$ ), de la velocidad del avión sobre el terreno ( $v$ ) y de la frecuencia del láser o *Pulse Repetition Frequency* (PRF). La frecuencia de pulsos láser es el número de puntos por segundo que es capaz de adquirir el sistema. Gracias a la posibilidad de enviar varios pulsos, son muchos los sistemas que alcanzan 500 kHz. Si no tienen la posibilidad de medir varios pulsos, los valores comunes están próximos a 250 kHz. La tecnología multi-pulso está explicada en el apartado 9.2.A.7.

Para su cálculo, se va a distinguir entre espaciado transversal a la pasada ( $d_{trans}$ ) y espaciado longitudinal ( $d_{long}$ ).

$$d_{trans} = \frac{h}{\cos^2 \theta_{inst}} \cdot \frac{\dot{\theta}_{inst}}{PRF} \quad d_{long} = v \cdot t_{sc}$$

Siendo  $\dot{\theta}_{inst}$  la velocidad instantánea del escáner medida en rad/s y  $t_{sc}$  el periodo de una línea de escaneo. La velocidad angular del escáner o frecuencia del ciclo de escaneado o barrido lateral corresponde al número de ciclos por segundo del sistema que desvía la señal láser (espejo oscilante, polígono rotatorio,...) para cubrir toda una franja de terreno. Se ajusta según la velocidad de vuelo siendo normales valores entre 100 Hz y 200 Hz.

Como se aprecia, la densidad transversal y longitudinal, que definen la densidad media de puntos, dependen de diferentes parámetros, como el patrón de escaneo, PRF, velocidad de barrido, altura de vuelo, la velocidad del avión, FOV, etc. Por tanto, se precisa una buena planificación del vuelo y una buena selección de los parámetros de adquisición. Esta planificación previa deberá ser aportada por un software adecuado de vuelo.

#### b) Integración sistemas Láser – GNSS/INS

Como se ha señalado anteriormente, en el centro de fase de la antena se fija un sistema cartesiano y, a partir de él, se determina la posición del IMU y del sensor láser. La unidad inercial (IMU) debe tener el eje Z según la vertical y los otros ejes se alinean con la dirección de vuelo y perpendicularmente a ella. El sensor láser se instala con el sistema de referencia de forma similar a la unidad inercial. Sería recomendable instalar una cámara digital o de video para tener información visual del área levantada por el sensor láser y como información de utilidad en el post-proceso, sobre todo en la fase de clasificación de puntos.

Los vectores que relacionan los tres orígenes pueden calcularse en tierra, así como la calibración pre-vuelo. La calibración debe realizarse para ajustar los errores sistemáticos producidos por la disposición de los equipos en la plataforma, los errores de alineación de la unidad IMU y del sensor láser. Hay que tener en cuenta que al IMU se le exigen precisiones superiores a  $0,02^\circ$  (que a 1000 m de altura puede dar un error de 0.35 m en planimetría). Las desalineaciones angulares de la unidad inercial y el sensor láser deben ajustarse en movimiento sobre áreas de control. Para ello, se utilizan superficies elevadas y horizontales de grandes dimensiones, como puede ser algún edificio con tejado horizontal con los lados de la fachada perpendiculares entre sí. A esta calibración se la denomina post-vuelo y permite comprobar las desviaciones obtenidas en XYZ al comparar las coordenadas del borde superior e inferior de la fachada en cuatro pasadas diferentes. De este modo, se obtienen los valores angulares de los giros en cada eje de la unidad IMU y del sensor láser que corrigen la solución, obteniendo los errores de cabeceo, alabeo y giro.

Además, se deben sincronizar los relojes de los diferentes sensores. El receptor GNSS funciona con el tiempo GPS, y el sensor láser y el IMU con la unidad controladora del sistema aerotransportado. El procedimiento se basa en seleccionar el tiempo GPS como referencia e interpolar el resto de posiciones.

#### c) Posición y orientación del sistema

Como se ha visto anteriormente, una vez se determina la distancia desde el sensor hasta el terreno, es necesario conocer la posición y orientación del sensor láser para poder calcular las coordenadas de los puntos medidos, que se obtiene mediante el sistema GNSS/INS. El sistema GNSS trabaja en modo diferencial para dar la precisión requerida, controlando la longitud de la línea base, y mediante el sistema IMU se podrá calcular la orientación (tres giros) que afecta a todo el conjunto.



Debido a la baja frecuencia a la que opera el sistema GNSS respecto del láser, es necesario realizar una interpolación. Pero una interpolación lineal entre ellos no sería suficiente, ya que puede haber variaciones intermedias significativas. El IMU aporta una solución a este problema, ya que registra en una frecuencia notablemente superior a la del GNSS, aunque sigue siendo inferior a la del láser (figura 137). De esta forma, proporciona la posición y la orientación de muchos más puntos de la trayectoria del avión. El GNSS evita que se acumule error en la posición del IMU y los parámetros de orientación externa de cada pulso láser se obtienen interpolando linealmente con las dos medidas IMU que lo abarcan. Al estar tan próximas, no debe haber cambios bruscos significativos entre ellas.

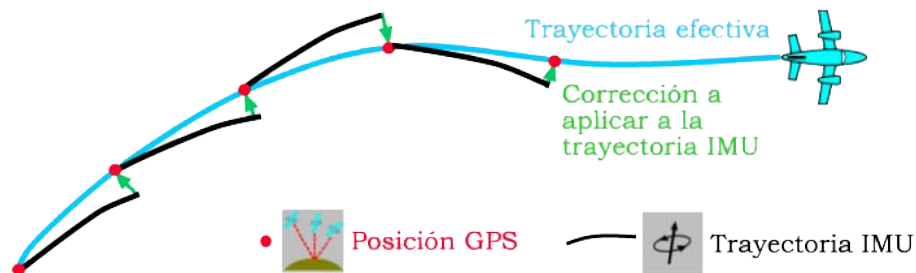


Figura 137: Corrección a aplicar a una trayectoria IMU.

Para que todo lo anterior ofrezca una solución válida, es necesario sincronizar la hora del sistema posicional (GNSS/INS) con la del escáner láser. Es decir, se tienen dos medidores de tiempo independientes: la hora GNSS y la hora interna del procesador del escáner. La primera es transmitida por los relojes atómicos de los satélites, por tanto, es más precisa que la segunda. Hay un sistema que cada cierto intervalo de tiempo toma la hora GNSS y la hora interna del procesador en el mismo instante. De esta forma, se determinan y corrigen las posibles diferencias entre ambos tiempos. Esta combinación de datos se lleva a cabo en el sistema de posicionamiento y orientación (POS) que procesa los datos de la antena GNSS y del INS mediante el empleo de un filtro de Kalman.

El filtro de Kalman, desarrollado por Rudolf Kálmán en 1960 y también conocido como estimación lineal cuadrática (LQE), es un algoritmo que utiliza una serie de mediciones observadas a través del tiempo, las cuales contienen ruido (variaciones aleatorias) y otras inexactitudes, y genera estimaciones de variables desconocidas que tienden a ser más precisas que aquellas basadas en una única medición. Trabaja de forma recursiva utilizando estos datos con ruido para producir una estimación estadísticamente óptima del estado del sistema subyacente. Desde un punto de vista teórico, la hipótesis principal del filtro de Kalman es que el sistema subyacente es un sistema dinámico lineal y que todos los errores y medidas tienen una distribución gaussiana. También se han desarrollado variaciones a la formulación original (filtro de Kalman extendido) que funcionan en sistemas no lineales.

Tiene numerosas aplicaciones en ciencias tecnológicas, por ejemplo, en navegación, guiado y control de vehículos. Además, es un algoritmo ampliamente aplicado en el análisis de series de tiempo utilizado, por ejemplo, en procesamiento de señales.



Este filtro funciona en dos pasos. En una primera etapa de predicción, se producen estimaciones del estado actual de las variables y sus incertidumbres. A continuación, después de obtener la siguiente medición (necesariamente afectada por un determinado error, incluyendo ruido aleatorio), estas estimaciones se actualizan mediante una media ponderada, dando mayor peso a las estimaciones que ofrecen fiabilidad. Debido a la naturaleza recursiva del algoritmo, puede ser aplicado en tiempo real, utilizando sólo las medidas actuales y el estado calculado previamente, sin necesidad de información previa.

#### d) Determinación de los puntos medidos

Una vez realizado el vuelo, se tienen dos conjuntos de datos: los de posición y orientación del sistema, y los de distancia medida y ángulo de escaneo. Como se ha comentado anteriormente, estos dos conjuntos están sincronizados temporalmente. Se tienen, por tanto, los datos necesarios para calcular las coordenadas de los puntos medidos.

La ecuación general del láser que permite calcular las coordenadas de un punto se expresa a continuación:

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{t_p} + \left( R_{INS}^{SR} \right)_{t_p} \cdot \left[ R_L^{INS} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \text{seno} \beta_{t_p} \\ \text{cos} \beta_{t_p} \end{pmatrix} \cdot d_{t_p} + b_L^{INS} \right]$$

Donde:

$(X_p Y_p Z_p)_t$	Coordenadas del punto P en el Sistema de Referencia Global
$(X_0 Y_0 Z_0)_{t_p}$	Coordenadas del sistema inercial dadas por la antena GNSS
$(R_{INS}^{SR})_{t_p}$	Matriz de rotación entre el INS y el Sistema de Referencia
$R_L^{INS}$	Matriz de rotación entre el sensor LiDAR y el INS
$\beta_{t_p}$	Ángulo de escaneo del punto P definido en el sistema LiDAR
$d_{t_p}$	Distancia medida al punto P desde el sensor LiDAR
$b_L^{INS}$	Vector entre el sensor LiDAR y el sistema inercial

La mayoría de los valores están asociados al momento de la medida  $t$ , de tal manera que se obtendrán unas coordenadas y una orientación diferentes del sistema, calculadas por la antena GNSS y el sistema inercial INS, respectivamente. La matriz de rotación y vector de desplazamiento entre el INS y el sensor LiDAR son fijos y obtenidos en el proceso de calibración del sistema. Hay que recordar que el sistema de referencia ligado al sensor LiDAR tiene el eje de las X en la dirección de vuelo, el eje Y hacia la derecha y el eje Z hacia abajo. Los datos medidos por el sensor son el ángulo  $\beta$  y la distancia  $d$ .

Estas coordenadas están referidas al sistema WGS84, propio del sistema GNSS. En determinadas ocasiones, será necesario transformarlas al sistema local que se desee. Además,

las alturas elipsoidales tienen que convertirse al sistema de altitudes que se emplee en la zona, normalmente, alturas ortométricas. Estas transformaciones inducen un error superior al que comete el escáner láser en sus medidas. En el Anexo D se detalla el tipo de transformaciones que se pueden aplicar.

### 3.3.3. Productos generados

Como se expuso en la introducción, el objetivo principal del registro geométrico de entidades es el modelado. Este modelado es digital ya que se emplearán técnicas basadas en el cálculo informático por medio de aplicaciones y algoritmos específicos. Sin embargo, la manera de calcular el modelo digital no es única y dependerá fundamentalmente de uso posterior. De hecho, los modelos digitales se podrán clasificar según su estructura interna de datos o según la tipología de los datos que alberga. Por tanto, según su aplicación final, se deberá elegir qué tipo de estructura debe tener y qué datos se incluirán en él. A continuación, se exponen las posibilidades con sus ventajas e inconvenientes.

#### 3.3.3.1. Según estructura

El primer resultado que se puede obtener a partir de la nube de puntos es un modelo digital con una distribución irregular de puntos. Este tipo de modelos se denomina TIN (*Triangulated Irregular Network* o Red de Triángulos Irregulares) y requerirá una aplicación que genere dichos triángulos (figura 138). Por el contrario, en muchas aplicaciones se prefieren los modelos regulares o rejillas (*grid* en inglés) por su facilidad de manejo (figura 139). En ese caso, es necesario considerar un proceso de interpolación sobre la nube de puntos clasificada. Cada tipo tiene sus ventajas e inconvenientes y, tanto en un caso como en el otro, deberá existir un control de calidad que certifique la validez del cálculo.

Las siguientes figuras muestran la misma zona del terreno representada mediante los dos tipos de modelos digitales expuestos. En la primera imagen, se muestra el modelo TIN, que incluye todos los puntos LiDAR registrados por lo que tendrá la misma precisión que la nube de puntos original, respetando todos los puntos que el usuario ha seleccionado. Sin embargo, se ha precisado de un minuto para calcular todos los triángulos mediante la relación de puntos cercanos. Se ha incluido un millón y medio de puntos y la memoria que ocupa es de 93 Mb.

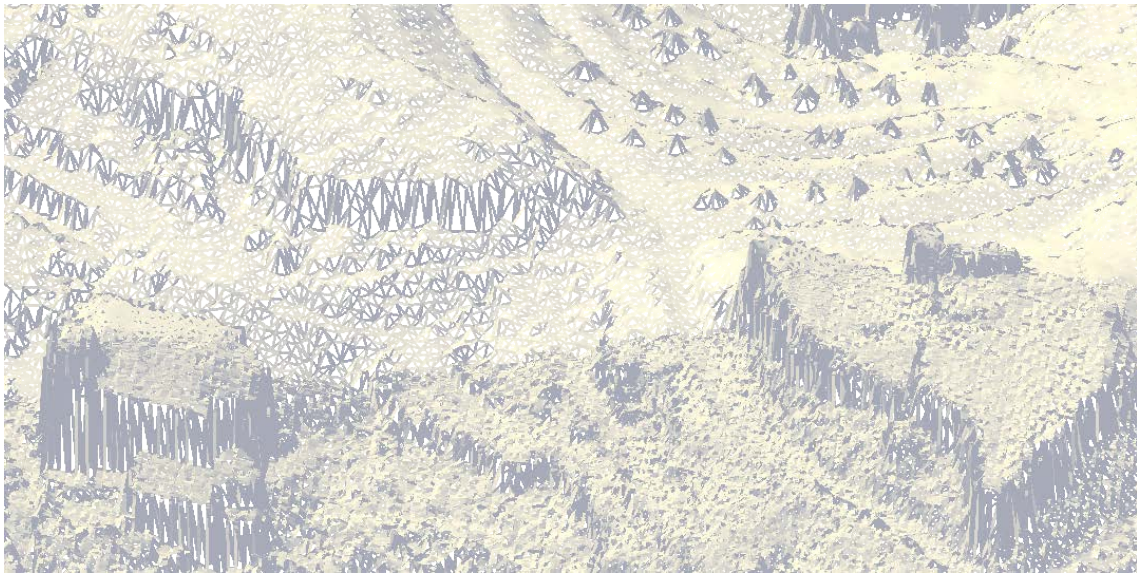


Figura 138: Ejemplo de modelo digital basado en estructura TIN.

En la segunda imagen, se muestra el modelo basado en rejilla. En este caso, los puntos están colocados según una estructura rígida de filas y columnas. Por tanto, no son los puntos originales sino una interpolación de ellos, lo que origina una pérdida de detalles. El tiempo para calcular este modelo apenas ha sido de cinco segundos. Se ha indicado una resolución espacial similar a la densidad LiDAR original, generándose un millón de puntos que ocupan en disco 4 Mb.

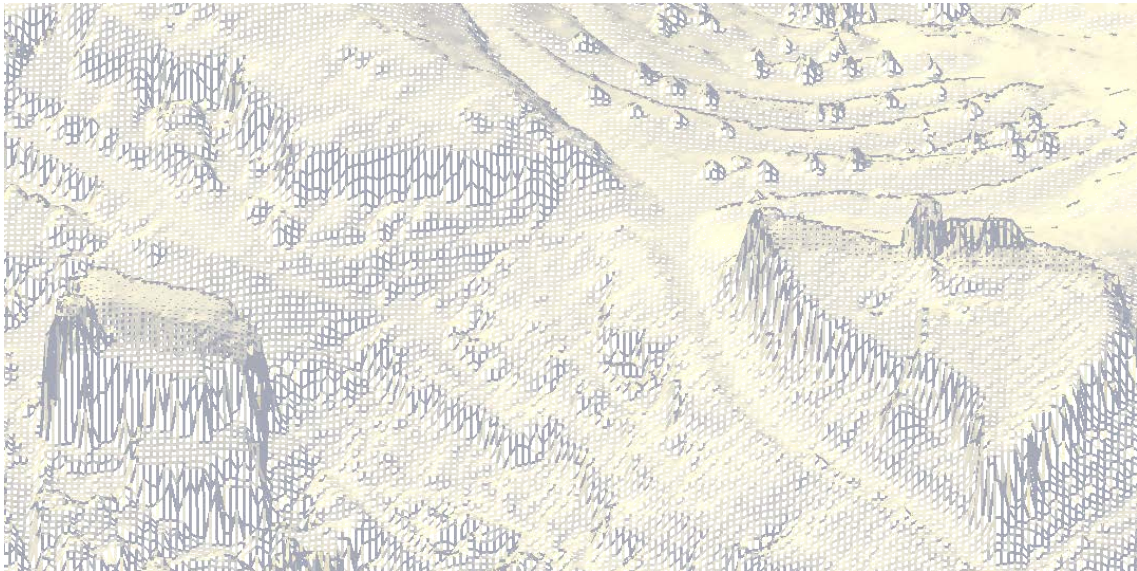


Figura 139: Ejemplo de modelo digital basado en estructura de rejilla.

Por tanto, se deberá optar por cada tipo de modelo digital en función de la utilidad que se le dé. El modelo TIN dará la opción de trabajar directamente con los puntos originales por lo que podría estar indicado para procesos de filtrado o clasificación de puntos. El modelo rejilla es más sencillo y rápido de manejar por lo que resulta indicado para el cálculo de mapas de curvas de nivel o para rectificación de ortofotografías.



En ambos, la calidad es muy alta, aunque en ocasiones sea necesario un proceso de edición manual para eliminar posibles errores en el proceso de filtrado y clasificación. Esta calidad es debida, sobre todo, a la sobreabundancia de puntos, lo que permite obtener un producto que representa fielmente el terreno, sin necesidad de introducir líneas de ruptura que definan los cambios de pendiente del terreno. Pese a todo, la inclusión de líneas de ruptura obtenidas mediante otros sistemas de medida, generará un producto de una calidad difícilmente superable. Por ello, en determinados trabajos de precisión (cartografía para obras de ingeniería) que se han registrado mediante LiDAR y fotogrametría, se genera un MDT mediante los puntos LiDAR y determinadas líneas de ruptura definidas estereoscópicamente.

Esta manera de clasificar el tipo de modelos geométricos es la clásica que se puede generar a partir de cualquier información tridimensional, ya sean nubes de puntos independientes o vectores en el espacio producto de una digitalización 3D. Como se aprecia, en el modelado se persigue la representación utilizando primitivas sencillas de superficie: en un caso, son triángulos irregulares y, en el otro, celdas cuadradas. Estas primitivas permitirán realizar posteriores operaciones de interpolación en aquellas zonas donde no se dispone de información. Es decir, se está transformando un conjunto de datos discretos a datos continuos que permitan realizar interpolaciones: obtener curvas de nivel, perfiles, movimientos de tierra, altitud para el cálculo de ortofotos, etc.

Sin embargo, ahora se dispone de una nube de puntos especialmente densa. Realizar una interpolación entre los puntos que se encuentren en una zona de influencia no es una tarea arriesgada porque siempre se dispondrá de información. Es decir, a pesar de ser un conjunto de datos discretos, su densidad le confiere una cierta propiedad de continuidad que permitirá realizar interpolaciones sin haber calculado previamente relaciones de vecindad entre sus puntos. Por tanto, se podría evitar un paso que, en ocasiones, consume tiempo de ordenador y, en cualquier caso, consume memoria y espacio en disco.



Figura 140: Nube de puntos ALS.

La figura 140 muestra la misma zona que las dos figuras anteriores utilizando los puntos LiDAR registrados y utilizando su propiedad “intensidad” para su representación. Como puede apreciarse, la densidad es muy alta y todas las zonas quedan cubiertas por puntos en función de la densidad de muestreo. Aquellas zonas con menos puntos se deben a su desnivel. Cabe decir que la imagen no resulta tan directa como en los dos casos anteriores, puesto que el hecho de utilizar primitivas superficiales permite utilizar vectores característicos y, por tanto, cálculo de sombras respecto de un punto de luz, lo que mejora notablemente la legibilidad del modelo.

Por tanto, se propone la nube de puntos LiDAR como un nuevo tipo de modelo digital sin estructura interna pero con una densidad alta de puntos que permite realizar interpolaciones sin riesgo de más error que el cometido por los modelos digitales clásicos. Por ello, las aplicaciones informáticas que utilicen datos LiDAR deberían disponer de un conjunto de herramientas adaptadas a este objetivo, sin tener que realizar las relaciones de vecindad mencionadas. En el apartado 5.7.1, se explica la herramienta para curvar una nube de puntos sin necesidad de calcular las relaciones de vecindad entre los puntos o calcular un modelo digital.

### 3.3.3.2. Según tipología

Una de las características principales de los datos LiDAR es la procedencia de los puntos medidos, puesto que mide la Tierra y cualquier objeto que se encuentre sobre ella. Es decir, los puntos serán el resultado de rayos que han reflejado sobre el suelo, edificios, árboles, vehículos, agua, mobiliario urbano, etc. La tarea primordial de edición de estos datos es dirimir de qué objeto proviene cada punto. Este proceso se denomina filtrado y clasificación de puntos y se verá en detalle en capítulos posteriores, puesto que existen muchas propuestas y algoritmos para realizar esta tarea eficazmente.

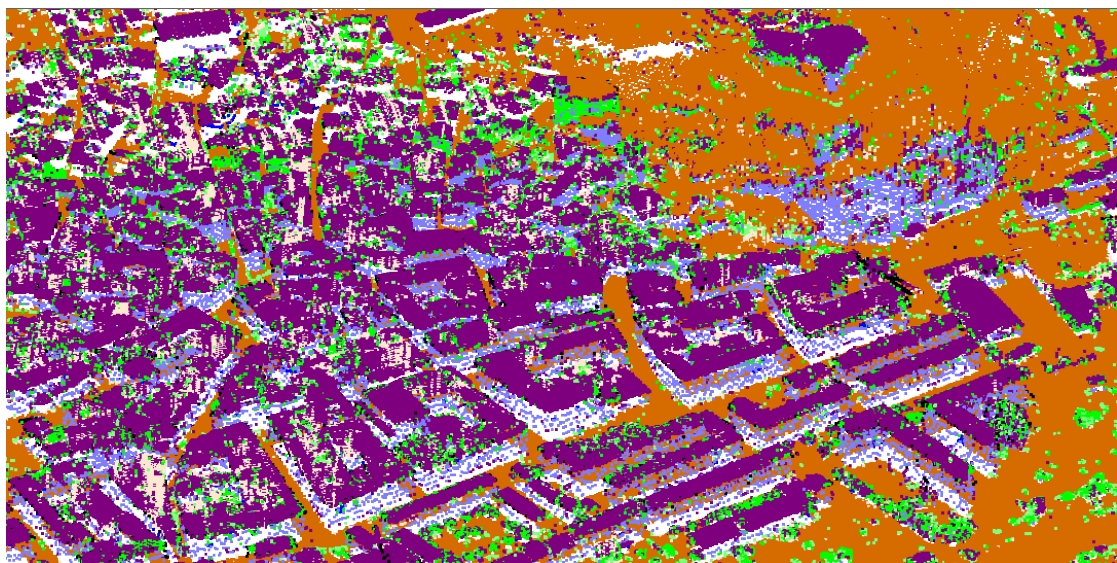


Figura 141: Nube de puntos ALS clasificada en función de los objetos medidos. Cada color indica un tipo de objeto, por ejemplo: naranja es suelo, morado es edificación, verde es vegetación y azul son puntos solapados.

En cualquier caso, el resultado será una nube de puntos clasificada en función de la procedencia que permitirá al usuario final decidir qué puntos se utilizan en cálculos posteriores. Un ejemplo de clasificación se muestra en la figura 141.

De hecho, una posible clasificación de los modelos digitales generados vendrá definida por esta selección de puntos. Si el modelo digital está compuesto únicamente por puntos pertenecientes al suelo “desnudo” (figura 142) se hablará de un Modelo Digital del Terreno (MDT). Si por el contrario, el modelo digital incluye además elementos estáticos sobre el suelo como edificios o vegetación, se hablará de un Modelo Digital de Superficies (MDS). La figura 143 muestra un ejemplo de MDT y la figura 144 muestra un ejemplo de MDS.

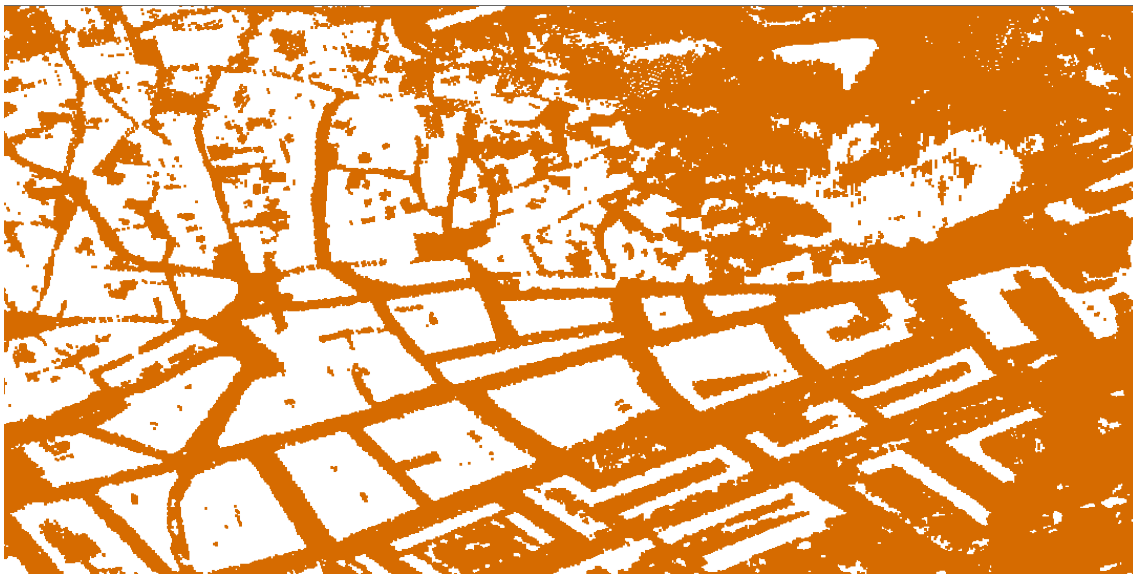


Figura 142: Nube de puntos ALS clasificada donde sólo se muestran los puntos pertenecientes al suelo.

Los huecos generados son debido a la eliminación de objetos con volumen. La gran mayoría de estos objetos son edificaciones y vegetación. Un algoritmo de triangulación generará los triángulos adecuados, “rellenando” estas zonas. El tamaño de estos triángulos es notablemente superior a los generados en zonas de terreno “desnudo”. Por ello, existen aplicaciones que pueden completar estas zonas para preservar la densidad del conjunto, utilizando para ello los puntos exteriores o la tendencia de la zona circundante. Sin embargo, este proceso de interpolación de nuevos puntos no confiere mayor precisión o ventajas al modelo, salvo que no se desee utilizar un modelo TIN o de rejilla y se opte por utilizar la nube de puntos sin estructuras de vecindad para cálculos posteriores.

Los MDT estarán destinados a cualquier cálculo o producto derivado que sólo precise de las cotas del terreno desnudo. Estos cálculos podrían ser cualquier aplicación para ingeniería civil como el cálculo de perfiles sobre el terreno o movimientos de tierra antes o después de una obra de infraestructura. El producto derivado más demandado de estos modelos son los mapas de representación del relieve, entre los que se incluyen mapas de curvas de nivel, de tintas hipsométricas, de sombras, de pendientes o de orientaciones.





Figura 143: Ejemplo de Modelo Digital del Terreno (MDT).

Los MDS se destinan a cualquier análisis que precise los objetos estáticos sobre el terreno. El producto más demandado es la rectificación de imágenes para obtener ortofotografías.

A priori, puede parecer que generar un MDS es sencillo pues prácticamente se contemplan todos los puntos de la nube, no siendo necesaria una clasificación para decidir su procedencia. Sin embargo, uno de los principales destinos de este modelo es la rectificación de imágenes para obtener ortofotografías. En este producto derivado, se debe corregir la proyección de aquellos objetos estáticos que tienen volumen como edificios, árboles y otro mobiliario urbano. Estos objetos son registrados por el ALS, pero también otros objetos no estáticos que no conviene tener en cuenta, como por ejemplo, vehículos.



Figura 144: Ejemplo de Modelo Digital de Superficies (MDS).



Por tanto, se debe realizar un control de calidad revisando aquellos objetos registrados por el sensor LiDAR y que no son útiles para calcular el MDS. Hay que tener en cuenta que estos objetos no estáticos pueden que no aparezcan en las fotografías a realizar porque, éstas han podido ser tomadas en un momento diferente al registro LiDAR. En la figura 145, se muestra un MDS con la ortofoto proyectada. En él se pueden ver ciertos promontorios sobre la carretera correspondientes a los vehículos donde reflejaron determinados pulsos LiDAR. Si estas “elevaciones” correspondieran con la información radiométrica no sería un problema pero, como se ve, no corresponden con la información almacenada en la imagen. En este caso, tanto los datos LiDAR como la imagen fueron tomados en el mismo momento con el mismo avión, pero aun así el movimiento de los vehículos provoca anomalías evidentes.



Figura 145: Errores en el modelado provocados por objetos en movimiento.

Además de los problemas mencionados con los objetos en movimiento se debe hacer hincapié que el LiDAR registra una densa nube de puntos, donde no existen líneas. Esto es importante para la definición de determinados objetos o estructuras del terreno puesto que su carencia provocará errores en procesos posteriores como mapas de curvas de nivel o el cálculo de la ortofoto. Estos errores serán mayores cuanto más abruptas o inclinadas sean las zonas que definen dichas líneas. Estas líneas son las denominadas líneas de ruptura de los modelos digitales y suelen ser digitalizadas en 3D mediante otras técnicas como, por ejemplo, la fotogrametría.

En la figura 146, se muestra una edificación con dos alturas registrada mediante un sensor ALS. En la primera de las imágenes se muestran las líneas teóricas de barrido del láser incidiendo sobre las cubiertas y una de las fachadas. En la siguiente imagen, se muestran los puntos registrados por el láser en los lugares donde reflejó el pulso. Por último, se muestra una imagen con los límites de las cubiertas calculados a partir de los puntos medidos.

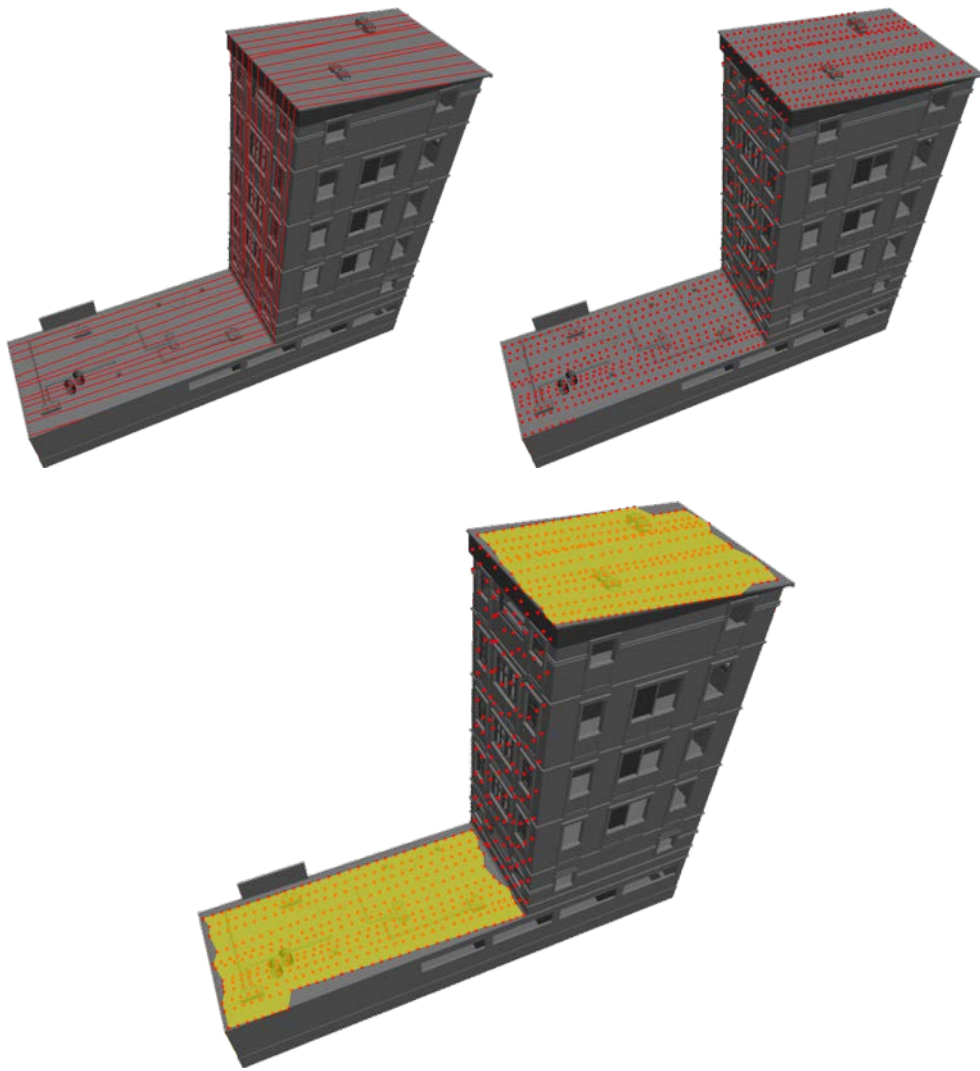


Figura 146: Registro de un edificio de dos alturas mediante ALS. Se pueden ver los puntos registrados y el límite calculado para cada cubierta en función de dichos puntos.

Como se puede apreciar, los puntos no coinciden exactamente con los límites de las cubiertas, reduciendo el área de cada límite calculado. Además, la distribución de dichos puntos es aleatoria, por lo que el límite calculado resulta irregular. Estos límites deben someterse a un proceso de generalización cartográfica para eliminar los puntos intermedios no significativos, buscando las orientaciones características de cada fachada del edificio.

La figura 147 muestra un ejemplo con puntos LiDAR clasificados en una zona edificada. A partir de estos puntos, se ha calculado los límites de edificación, pero estos límites no se ajustan perfectamente a los límites registrados por la imagen digital.





Figura 147: Nube de puntos LiDAR clasificada sobre fotografía aérea georreferenciada más límites de edificación extraídos a partir de estos puntos.

Como consecuencia de esto, en la figura 148, se muestra el modelo realizado con estos límites y con el que se calcularía la ortofoto, donde se aprecian los errores en los bordes de las edificaciones.



Figura 148: Errores en el modelo producidos por la indefinición en los bordes de los objetos.

### 3.3.3.3. Según datos adicionales

#### a) Imagen georreferenciada

Como se ha visto, dos de los productos inmediatos que se pueden obtener a partir de una nube de puntos LiDAR son el MDT y el MDS. Los modelos digitales son la base de cálculo de la ortorrectificación de imágenes aéreas para obtener uno de los productos más demandados en cartografía: la ortofoto. Esta ortorrectificación consiste en corregir las deformaciones sufridas por la imagen de un objeto debidas a la proyección no ortogonal del sensor (normalmente cónica) y a la diferencia de profundidad (o relieve) de los elementos que aparecen en la fotografía. El cálculo se realiza utilizando las fórmulas de colinealidad y el modelo digital del objeto fotografiado. Su precisión podrá ser igual al tamaño del píxel registrado en las zonas extremas de la fotografía cónica. Por ello, para aumentar la precisión, de cada fotografía original sólo se utiliza la parte más cercana al punto principal, en la medida de lo posible.

El resultado es una imagen digital georreferenciada y con proyección ortogonal por lo que puede ser integrada en cualquier SIG (Sistema de Información Geográfica) junto con otros datos vectoriales. Al tener una proyección ortogonal la escala es constante en todos sus puntos por lo que se puede realizar mediciones directamente. Al ser una imagen de información continua, se pueden realizar interpretaciones sobre el objeto registrado mejor que con datos vectoriales, donde se ha realizado una abstracción de la realidad mediante primitivas vectoriales. Por ello, las aplicaciones de la ortofoto son numerosas, por ejemplo, catastro y aplicaciones agrícolas o forestales pudiendo identificar diferentes usos de suelo, documentación de patrimonio o cartografía en general identificando diferentes elementos según su radiometría, etc.

Tradicionalmente, se ha diferenciado entre ortofoto convencional y ortofoto verdadera o “*true-orto*” cuando se contemplaban las alturas de objetos como edificios y árboles y se cubrían las zonas de sombra utilizando múltiples imágenes. Esta segunda opción ha sido siempre costosa porque conlleva, por un lado, un alto recubrimiento en el diseño de las pasadas fotogramétricas con el objetivo de cubrir todas las zonas de sombra generadas por el abatimiento de los edificios; y, por otro lado, un modelo digital que contemplara la altura y proyección de dichos objetos, lo que conlleva registrar estos edificios y generar un objeto con su proyección sobre el suelo.

Para realizar la ortofoto es necesaria, obviamente, la imagen digital y su georreferenciación. La imagen puede tener su origen en un vuelo realizado con una cámara de gran formato adicional al propio vuelo LiDAR o de una cámara de medio formato acoplada rígidamente al propio sistema LiDAR. Esta imagen podrá ser pancromática (en blanco y negro y, normalmente, de mayor resolución espacial), color RGB o infrarrojo para análisis de vegetación y humedad. Estas imágenes deberán tener un archivo de georreferenciación con la orientación interna y externa, consistente en la posición absoluta del centro de proyección en el momento de la toma y los ángulos  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$  respecto de los

ejes de coordenadas. Hoy en día, la georreferenciación se obtiene OTF (*On The Fly*) ya que las cámaras digitales trabajan conjuntamente con sistemas de posicionamiento GNSS/INS. No obstante, según el tipo de proyecto estos valores de georreferenciación suelen ajustarse mediante el proceso de aerotriangulación, mejorando los resultados.

Además, es necesario un MDS. Como se ha visto anteriormente, es necesario generar un MDT sólo con los puntos pertenecientes al suelo desnudo y añadir los límites vectoriales de aquellos objetos que tengan volumen. Básicamente, se deberán incorporar los edificios y las masas arbóreas.

En el proceso de cálculo de la ortofoto, se consideran también las zonas de oclusión o sombra generadas por el abatimiento del edificio ocurrido cuando se toma una imagen cónica. Estas zonas de sombra no podrán rellenarse con su color correspondiente por no registrarse desde una determinada perspectiva. Si se incluyen más fotografías de la zona, se deberá buscar en cuál de ellas se ha podido registrar esta zona para rellenar la ortofoto con los valores correspondientes. Esta operación precisa de un vuelo fotogramétrico con unas condiciones especiales de recubrimiento. En zonas urbanas este recubrimiento puede llegar a ser del 80% longitudinal y 40 % transversal, lo que encarece en exceso el proyecto.

Una vez se han calculado cada una de las ortofotos, se debe realizar la unión de todas ellas para generar un único archivo denominado “mosaico de ortofotos”. Debido a problemas geométricos y radiométricos esta unión no puede ser realizada en cualquier lugar, necesitando de un algoritmo que busque las zonas de mayor similitud para generar, de forma automática, la línea de unión o “*seam line*”.

Además, se deberá corregir el archivo con el mosaico de las posibles diferencias radiométricas entre las diferentes ortofotos, debido a problemas de iluminación en el momento de la toma. Por último, el mosaico debe ser nuevamente segmentado para generar hojas cartográficas con dimensiones similares a las hojas distribuidas de formato vectorial.

## b) Color registrado

No siempre se dispone de una imagen georreferenciada externa para poder calcular la ortofoto. Sin embargo, es posible que el sistema LiDAR lleve acoplada una cámara de medio formato que permita dar color RGB o NIR a la nube de puntos registrada. De hecho, el formato de archivos estándar utilizado para la transferencia de información LiDAR contempla en su estructura el almacenamiento de esta información.

Por ello, una solución intermedia podría ser la utilización del valor RGB almacenado por la nube de puntos para intentar reconstruir una imagen ortogonal. En este caso, la imagen generada tendrá la misma resolución espacial que el espaciamiento de los puntos LiDAR que, obviamente, no será tan pequeño como si se tuviera una imagen externa.

El proceso de generación no necesita ortorrectificación, puesto que se dispone de la nube de puntos en 3D, pudiendo calcular esta imagen en cualquier perspectiva.



### c) Intensidad registrada

Sin embargo, no es habitual que los puntos LiDAR tengan almacenado el valor de RGB registrado por una cámara óptica. En este caso, también se podría calcular una imagen georreferenciada utilizando el valor de la intensidad registrado por el sensor LiDAR. En esta imagen, se podrán diferenciar tipos de superficie ya que el valor de intensidad registrado depende del material de la superficie, rugosidad, humedad o ángulo de incidencia. El resultado es una imagen en gama de grises que, al igual que antes, podrá estar orientada en cualquier perspectiva.

## 3.3.3.4. Otros cálculos

### a) Extracción automática de entidades cartográficas

Como se ha puesto de manifiesto en capítulos anteriores, la nube de puntos LiDAR define con gran precisión la geometría del objeto medido. En el caso de cartografía, esto significa que se obtiene un modelo digital (del terreno o de superficies) con gran detalle, mejor que lo que se obtiene mediante fotogrametría aérea. Sin embargo, el producto más demandado es la cartografía vectorial de una zona, es decir, el registro de la entidades geográficas utilizando primitivas vectoriales con diferentes dimensiones, como son el punto, la línea o la superficie.

A pesar de la buena definición de los puntos, la extracción de forma automática de estas entidades no resulta sencilla. La mayoría de entidades geográficas registradas en cartografía no se corresponde con un cambio geométrico o dicha información no es suficientemente pronunciada como para poder ser extraída de un modelo digital. Ejemplos de estas entidades podrían ser las aceras, cambios de uso de suelo, líneas definitorias de carreteras, etc. Otras entidades sí se corresponden con importantes cambios en el modelo digital como pueden ser vaguadas, cabezas y pies de talud y objetos con volumen, como edificios o vegetación. Los dos primeros casos corresponden con las líneas estructurales de un MDT. Se debería recurrir a un algoritmo de extracción de estas líneas en función de los cambios de pendiente apreciables en un modelo del terreno desnudo (Hug & Wehr, 1997).

En el caso de los objetos con volumen, su registro vectorial suele realizarse en fotogrametría aérea por su cota más alta o cumbre. Por tanto, para poder extraerlos de forma automática se debería calcular la línea límite que encierra a todos los puntos medidos sobre el objeto. Esto supone que previamente deben clasificarse de forma apropiada dichos puntos, lo cual constituye uno de los pilares de la edición de datos LiDAR: la clasificación. Además, deberá utilizarse un algoritmo que permita definir y calcular esta línea (Ekhtari, et al., 2008).

Esto añade una aplicación de gran interés y aplicación a los productos que se pueden extraer de una nube de datos LiDAR, ya que sin necesidad de interpretación (como en



fotogrametría), se pueden calcular líneas de cambios definitivas de objetos como edificaciones (Hermosilla, 2011). Estos límites se pueden utilizar para la reconstrucción 3D de estos objetos o para su comparación con bases de datos previos. Por ejemplo, se podrían detectar cambios en la superficie edificada de un lugar, herramienta de gran valor catastral (Sester & Neidhart, 2008).

Sin embargo, a pesar de que este cálculo es factible, la forma de estas líneas responde a la distribución de los puntos medidos, los cuales no siempre estarán en el límite de la entidad, tal y como se comentó en el apartado anterior. Para corregir esta circunstancia, se debe recurrir a algoritmos de generalización de estructuras urbanas.

En Cartografía, existen diversos algoritmos para la generalización de entidades correspondientes a edificaciones que tratan de simplificar la forma sin perder la ortogonalidad de los segmentos que los definen (Arranz, et al., 2012). Sin embargo, estos métodos deberían tener pequeñas modificaciones para adaptarse a la peculiaridad de los datos LiDAR.

#### b) Cálculo de volúmenes

Si se realiza una correcta clasificación de los puntos LiDAR se obtienen todos los puntos registrados sobre las cubiertas de los edificios y sobre la copa de los árboles. De esta forma, se calcula la estructura de estos objetos y se realiza una reconstrucción en 3D. Por tanto, uno de los cálculos posibles sería el volumen que definen estos objetos.

Debido a que la mayoría de los objetos con volumen registrados e identificados en el proceso de clasificación son las edificaciones y la vegetación, el cálculo de volumen se podrá realizar sobre zonas construidas o masa forestal. En este segundo caso, tiene un indudable valor en aplicaciones agroforestales.

#### c) Control de cambios

Gracias a la rapidez de cálculo y de generación del MDT y del MDS a partir de datos LiDAR, una de las aplicaciones más demandadas es la detección, valoración y catalogación de zonas que hayan sufrido cambios significativos durante el tiempo. Este cálculo se realiza mediante la comparación de conjuntos de datos de la misma zona registrados en épocas diferentes. Por tanto, es necesario disponer de datos tridimensionales en diferentes épocas.

Este caso es habitual en el control dimensional de obras de ingeniería donde se requiere un seguimiento del avance temporal de estas. Se podrían realizar vuelos LiDAR periódicamente y, mediante la comparación de los modelos generados por cada uno de ellos, calcular los diferentes movimientos de tierras que se han producido.

Otra interesante aplicación surgida del cálculo de cambios en territorio estaría en Catastro, puesto que a partir de un vuelo LiDAR, y mediante la clasificación de puntos pertenecientes a edificaciones y posterior extracción de sus límites, se podrían detectar

aquellas zonas que han sufrido cambios en su superficie edificada con respecto a los datos registrados previamente en el Catastro.

#### d) Modelos 3D

Una de las aplicaciones actuales de la cartografía es la utilización de modelos 3D, sobre todo de entornos urbanos donde aparecen importantes cantidades de objetos con volumen como edificios, árboles o mobiliario urbano. Estos modelos requieren un registro exhaustivo de la forma 3D de todos objetos, no siendo una tarea sencilla ni rápida. Sin embargo, mediante el registro LiDAR y la clasificación de objetos, se podrían generar estos modelos de una forma prácticamente automática. Además, estos modelos se pueden exportar en formatos utilizados por navegadores o aplicaciones interactivas 3D que utilizan la cartografía para mostrar el entramado urbano a los usuarios.

La formación de estos modelos puede verse enriquecida con la combinación de imágenes obtenidas con sensores ópticos. Estas imágenes son utilizadas como tapiz sobre el MDT o sobre los objetos 3D.

### 3.3.4. Aplicaciones

En estos últimos años, el ALS se ha aplicado en trabajos de altos requerimientos altimétricos debido a su precisión y su productividad. Como se ha visto, las principales ventajas del LiDAR son el alto número de puntos obtenidos (hasta 40 puntos/m<sup>2</sup>) y su gran homogeneidad espacial. La desventaja es la dificultad en identificar el objeto sobre el que impacta. Por esa razón, la toma de datos suele acompañarse de la adquisición de imágenes del área levantada. De esta forma, la nube de puntos generada se puede clasificar para preservar las entidades útiles para la función de cada modelo digital (Ibáñez, 2008).

Los equipos aerotransportados han evolucionado hacia unas mayores frecuencias de escaneado (500 kHz), un mayor registro de retornos para un pulso, un menor tamaño y la integración con otros sistemas. A continuación, se hace referencia a algunas de las principales aplicaciones actuales para estos equipos.

Realización de cartografía para su posterior uso en obras de ingeniería lineales, por ejemplo, carreteras, vías férreas, gasoductos o canales. Este tipo de trabajos se denominan corredores y existen modelos específicos de sensores ALS para este tipo de trabajos. En ellos, se exige una gran precisión pero no se requiere un gran ancho de barrido, por lo que la altura de vuelo puede ser inferior a proyectos de cartografía de grandes zonas.

Cartografía para líneas eléctricas y torres incluyendo la zona despejada de vegetación y el área circundante. Esta toma de datos suele venir combinada entre láser aéreo y láser terrestre. Mediante los datos tomados de la zona circundante se puede extraer la tipología de la vegetación y prever problemas en el crecimiento de la vegetación con el área de

seguridad de la línea eléctrica, pudiendo establecer planes de mantenimiento. En determinadas ocasiones se pueden utilizar UAV equipados con sensor LiDAR y cámaras térmicas para la detección de zonas de sobrecalentamiento.

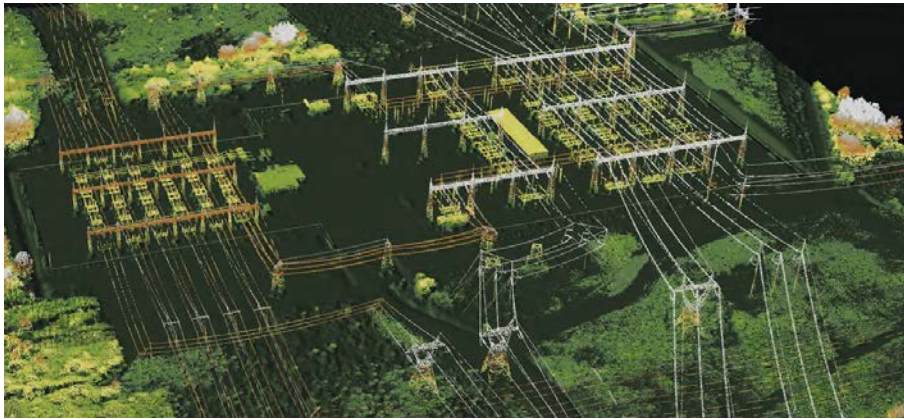


Figura 149: Centro de generación eléctrica registrado con LiDAR (Optech, 2013).

Medición de zonas costeras, incluyendo dunas, marismas y humedales, determinando el cambio, la evolución y la erosión costera. De hecho, existen sensores LiDAR específicos (ALB, descritos en el apartado 3.3.5) para estas zonas que emiten dos longitudes de onda diferentes, una para poder registrar la superficie del agua y las zonas emergidas y otra para las zonas sumergidas. Dependiendo del sensor y la turbidez del agua, la profundidad máxima que puede registrar el LiDAR es de 80 m.

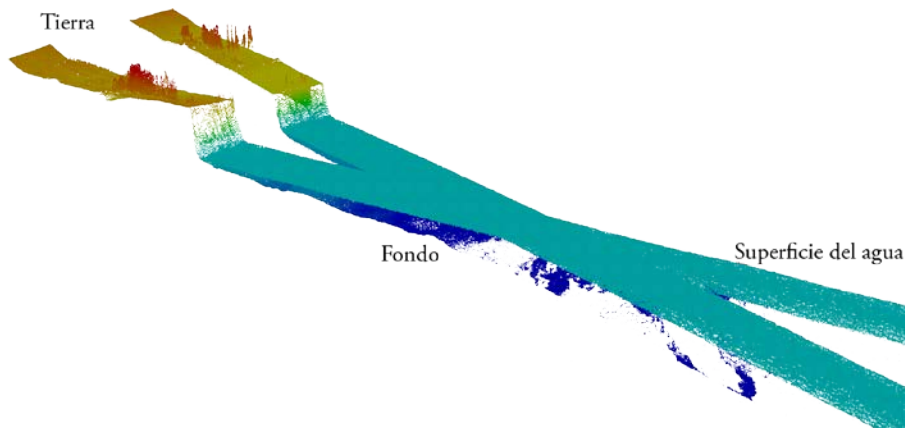


Figura 150: Ejemplo de registro en aguas poco profundas y aledaños (Optech, 2013).

Mediciones con requerimientos de alta precisión y densidad, por ejemplo, la cartografía de zonas inundables, generación de MDT y cálculo del volumen de minas a cielo abierto, depósitos de residuos o cartografía de importantes infraestructuras (aeropuertos, puertos o grandes instalaciones industriales).

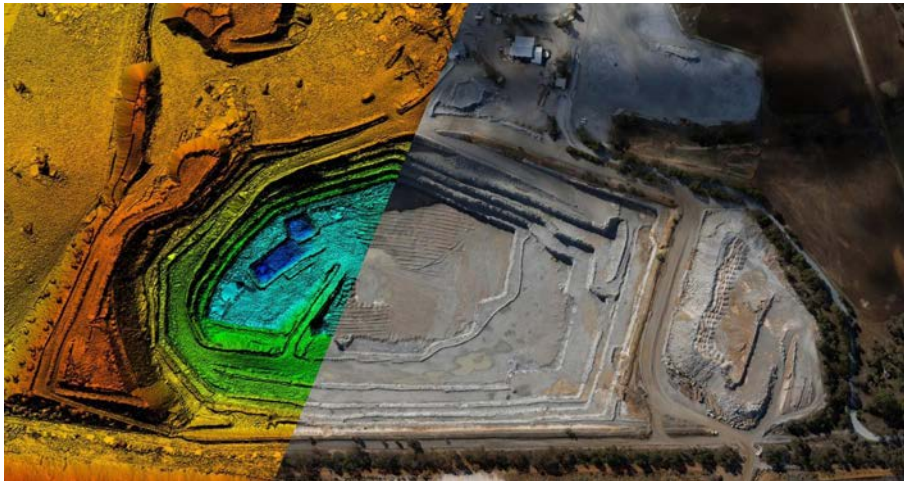


Figura 151: Ejemplo de mina a cielo abierto en Río Tinto registrada con LiDAR (Strecha, 2012).

Generación de modelos digitales en zonas urbanas, en las que se extrae de forma automática los edificios, puentes y mobiliario urbano, con la posterior generación de modelos 3D de ciudades.

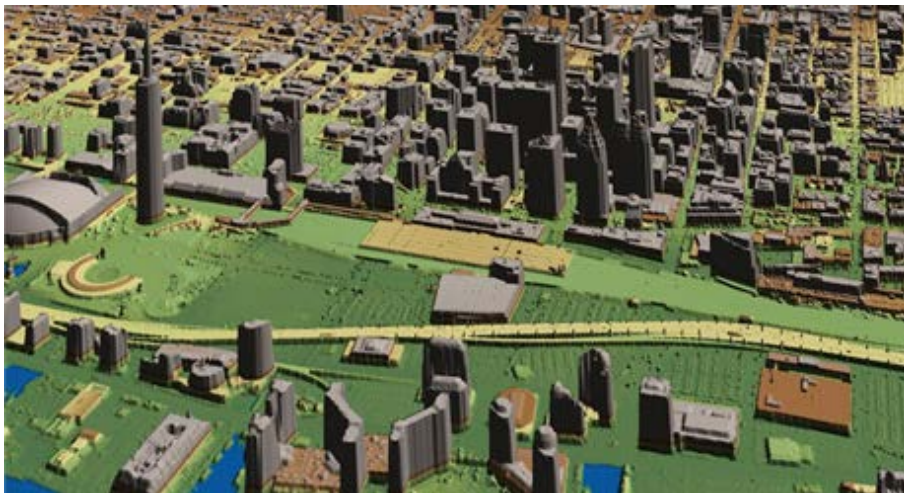


Figura 152: Modelo 3D de ciudad generado a partir de datos LiDAR (Optech, 2013).

Generación expedita de cartografía y evaluación de daños de desastres naturales, por ejemplo, después de huracanes, terremotos o deslizamientos de tierra. En estos casos, una opción factible es el empleo de UAV por su posibilidad de acceso a zonas difíciles de volar o de riesgo para el ser humano.

Medición de cubiertas de nieve o hielo, incluyendo monitorización de glaciares. Cálculo de la acumulación de nieve para la estimación de riesgo de aludes, etc. Para este tipo de trabajos también existen modelos de LiDAR específicos que emiten con una longitud de onda que permiten calcular el grosor de capa de nieve o hielo.

Generación de modelos en zonas forestales con el posterior cálculo de parámetros dasométricos, por ejemplo, altura de los árboles, diámetro de copa, densidad de arbolado,



estimación de la biomasa, determinación de los límites de las zonas boscosas o control del crecimiento (ISPRS, 2007). Al igual que en casos anteriores, se pueden emplear sensores específicos que permiten gestionar infinitos pulsos de retorno generando la forma del objeto medido. Es la tecnología denominada “*full-waveform*”, descrita en el apartado A.6.

Generación de modelos destinados al cálculo de ortoimágenes y *true-orto* a partir de los datos proporcionados por cámaras ópticas.

Registro de sitios arqueológicos o generación de modelos digitales para la localización de vestigios de antiguos asentamientos humanos. Gracias a la posibilidad que tiene el LiDAR de penetrar la cubierta vegetal es posible realizar MDT excluyendo la vegetación que permiten detectar huellas arqueológicas.

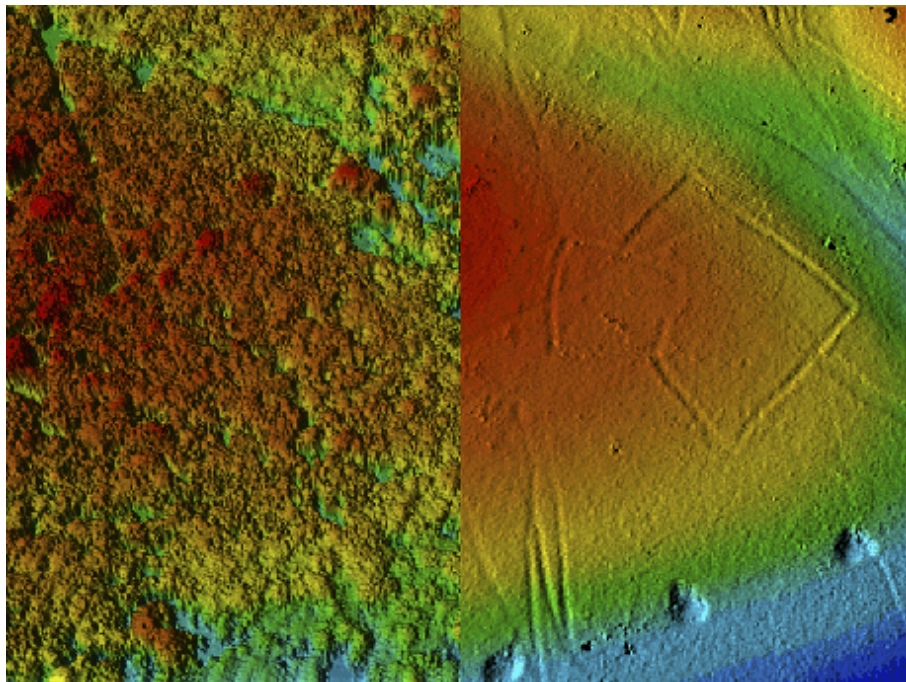


Figura 153: Registro mediante LiDAR de un asentamiento arqueológico. En la imagen de la izquierda sólo se aprecian las copas de los árboles. En la imagen de la derecha, se ha generado el MDT después de la clasificación de los puntos, apareciendo la huella de un asentamiento de la Edad de Hierro (English Heritage, 2013).

### 3.3.5. LiDAR batimétrico

El LiDAR batimétrico (ALB) es la técnica de medida de profundidades de aguas poco profundas o próximas a la costa utilizando escaneado láser. También se denomina LiDAR hidrográfico (ALH) cuando su propósito es la elaboración de cartas náuticas. A partir de estas medidas, es posible realizar mapas de zonas batimétricas en ríos, canales, lagos, puertos, zonas costeras, playas, espigones, rompeolas, barreras de coral, ubicación de yacimientos arqueológicos submarinos como pecios o hundimientos, etc. Además, se puede realizar simultáneamente registro de superficies emergidas (Guenther, et al., 2000).

Las ventajas de ALB sobre otras tecnologías de registro subacuático residen en la rapidez de registro, tanto para pequeños como grandes proyectos, que permite calcular con celeridad daños producidos por tormentas o desastres ecológicos, la posibilidad de registro a zonas de acceso complicado con sensores transportados en barco y la posibilidad de registrar simultáneamente el fondo marino, la costa o playa y resto de obras de ingeniería de puerto. Además, se ha demostrado que los costes en la adquisición de datos pueden ser de un quinto o la mitad de los invertidos con un sensor transportado en barco, sin contar que se pueden entregar más documentos además de los datos de profundidad.

La técnica de registro se basa en la utilización de dos longitudes de onda diferentes. Una, próxima al verde (532 nm), para el registro del fondo marino y otra, próxima al infrarrojo cercano (1064 nm), para el registro de la superficie del agua. Teniendo en cuenta la velocidad de la luz en el aire y en el agua, es posible calcular la profundidad del fondo como la diferencia de los valores de altitud generados con ambas ondas. Las alturas de vuelo habituales oscilan entre 200 y 500 m y se utilizan FOV estrechos, entre 15° y 20°, para evitar errores en el cálculo del tiempo de vuelo de la onda con geometrías extremas. De esta forma, los anchos de barrido son estrechos comparados con ALS topográficos (Quadros, et al., 2008).

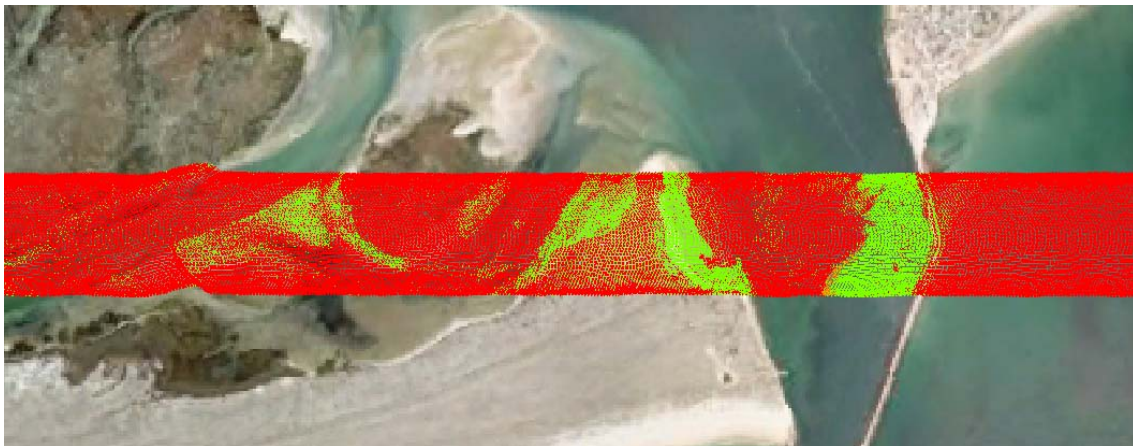


Figura 154: Pasada de LiDAR batimétrico.

A pesar de las ventajas, no es una técnica sustitutiva del sonar, sino complementaria. Funciona mejor en zonas de poca profundidad pero no en zonas profundas, donde el sonar obtiene mejores resultados. De hecho, según la claridad del agua, la profundidad máxima detectable por ALB es de 80 m (3 distancias Secchi), en el mejor de los casos. Además, la resolución espacial (4 ó 5 m) no es mejor que los equipos sonar más modernos, por lo que no pueden registrar objetos de pequeño tamaño. Para mejorar este aspecto, los equipos actuales deberían llegar a frecuencias similares a las utilizadas en ALS topográficos.

Sin embargo, esta técnica podría resultar de gran utilidad para la localización de pecios o yacimientos arqueológicos sumergidos, que se encuentren en aguas someras o cerca de la costa. De esta forma, podría abaratar costes y complementar (e incluso sustituiría) algunos de los métodos actuales para la documentación de patrimonio histórico sumergido (Juan, 2009).



### 3.3.6. Precisión geométrica

Como cualquier sistema de medida, se producen errores sistemáticos que son visibles en las zonas de solape entre diferentes tomas. Su cuantificación puede llevarse a cabo mediante alguna otra técnica de medida de coordenadas, pero no existe una fácil solución para su eliminación. A priori, se puede tener la percepción de que los errores se producen en mayor medida en la altimetría de los objetos. Sin embargo, suelen ser mayores en la posición planimétrica de los puntos medidos. Por ello, la eliminación de los errores debe realizarse en 3D. Aunque sea sencillo definir el origen de los errores, no es fácil su eliminación debido a la multiplicidad de orígenes de esos errores, la escasa información o la propia complejidad del sistema. A pesar de ello, algunos autores han expuesto diferentes propuestas para abordarlo (Filin, 2005).

La precisión en el registro de la altitud de los puntos depende de la precisión del escáner y de la determinación de la altitud GNSS (Kraus, 2007). Ninguno de los efectos depende en gran medida de la altura de vuelo. De hecho, la dependencia de la altura de vuelo en la precisión de altitud de los puntos procede de la trayectoria que atraviesa el rayo a través de la atmósfera (fuente de error), del aumento de la huella del haz láser con la distancia y de la disminución de la energía reflejada por los objetos interceptados por el láser. Esto caracteriza a esta tecnología, ya que la precisión altimétrica es de 2 a 5 veces mejor que la planimétrica, al contrario del resto de tecnologías. La precisión planimétrica está influenciada por la propia precisión planimétrica del GNSS, la precisión del IMU y, en menor medida, de la precisión en el registro del ángulo de reflexión en el escáner. Las dos últimas fuentes de error están muy influenciadas por la altura de vuelo, viéndose reducida la precisión cuando aumenta ésta. Por estas razones, junto a la potencia de los equipos, las alturas de vuelo en ALS se limitan al intervalo de 500 m a 3000 m.

A partir de la ecuación general del láser se deriva su influencia, que puede ser muy variada (Baltsavias, 1999). Por un lado, destacan los errores instrumentales propios de los componentes que conforman el sistema. El sistema láser tendrá una cierta precisión en la medida de la distancia y en la desviación del ángulo (debido a la precisión del elemento que desvía el rayo y a la refracción atmosférica), así como errores en su electrónica. El sistema GNSS tendrá imprecisiones en el receptor y en la red de referencia en tierra. Además su precisión dependerá de la configuración de la constelación de satélites y de la geometría con respecto a la antena montada sobre el avión. Por último, el sistema inercial también tiene indeterminaciones en la frecuencia así como derivas que deben corregirse.

Por otra parte, pueden existir errores debido a la falta de calibración del montaje conjunto formado por la antena GNSS, el sistema inercial y el propio láser. A esto habría que añadirle la necesidad de sincronización e interpolación entre los datos generados por cada uno de los sistemas ya que, cada uno de ellos, tienen su propio origen en la medida del tiempo y su propia frecuencia de registro.

Por último, habría que tener en cuenta los errores inducidos por una transformación post-proceso de las coordenadas. Esto se produce cuando es necesario cambiar del sistema de referencia utilizado por el sistema GNSS (WGS84) al sistema de coordenadas local. Al respecto, cabría advertir que esta transformación ya no es necesaria para España ya que el

sistema actual adoptado (ETRS-89) es prácticamente idéntico al utilizado por el sistema GNSS. Sin embargo, sí que es preciso considerar el error al transformar las altitudes elipsoidales a cotas ortométricas, ya que depende de la precisión del modelo del geoide que se utilice (véase el apartado D.2.3).

Se puede realizar una cuantificación del error en el dato registrado por medio de ALS mediante la geometría representada en la figura 155 (Baltsavias, 1999).

En primer lugar, se establece un sistema de coordenadas fijo en el sensor, donde el eje Z es la vertical que pasa por el sensor, el eje X es perpendicular al anterior y en la dirección longitudinal del avión y el Y perpendicular a los dos anteriores para formar un sistema cartesiano. De esta forma, se define el posible origen de los errores (o indeterminación en la medida) que podrían provenir de los ángulos de giro (alabeo  $\Delta\omega$ , cabeceo  $\Delta\gamma$ , giro  $\Delta\kappa$ ), del ángulo de apertura del láser ( $\Delta\beta$ ), de la medida de la distancia al punto debido a la huella del láser ( $\Delta R$ ) y de las coordenadas absolutas del sensor ( $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$ ). Los primeros tres errores provendrían de la precisión del sistema inercial (INS), los dos siguientes procederían del sensor láser y los tres últimos de la precisión del sistema de posicionamiento GNSS.

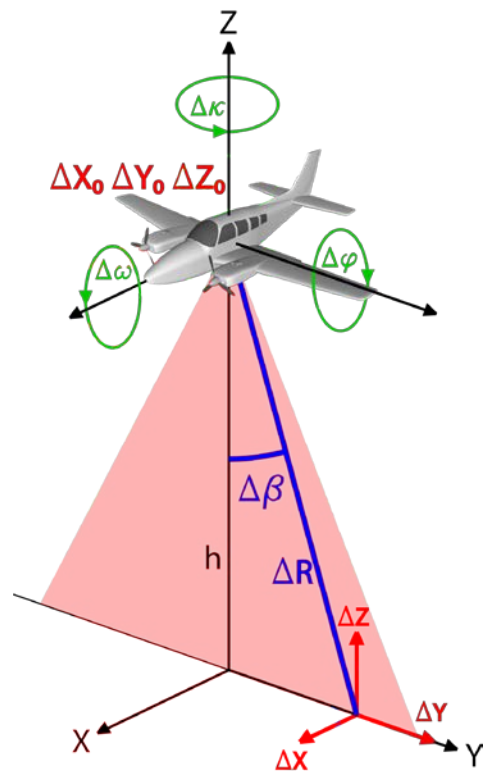


Figura 155: Geometría de la precisión en la medida ALS.

Estas indeterminaciones provocarán una indeterminación (o error) en las coordenadas finales del punto medido, es decir,  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ . La parte planimétrica se fijaría en la dirección de vuelo y su perpendicular, y la parte altimétrica, verticalmente y perpendicular a las anteriores.

Para poder valorar la transmisión del error a las coordenadas finales a partir de la precisión de las medidas, se van a realizar unos supuestos numéricos que, utilizando la ecuación general del LiDAR, proporcionarán unos valores finales:

$$\begin{array}{lll} \omega = \gamma = \kappa = 0^\circ & \Delta\omega = \Delta\gamma = 0.03^\circ & \Delta\kappa = 0.04^\circ \\ \Delta X_0 = \Delta Y_0 = \Delta Z_0 = 8 \text{ cm} & \Delta R = 5 \text{ cm} & \Delta\beta = 0.02^\circ \end{array}$$

Además, se considerarán dos alturas de vuelo,  $h = 400 \text{ m}$  y  $h = 1000 \text{ m}$ , para analizar cómo influye este parámetro tan importante en fotogrametría sobre puntos medidos mediante ALS.

Según estos valores iniciales, se completa la tabla 10 para puntos medidos a diferentes ángulos de apertura ( $\beta$ ), obteniéndose los siguientes errores que provocan cada uno de las medidas. Las dos columnas situadas a la derecha expresan el error total en cada coordenada para las dos alturas de vuelo propuestas.

Tabla 10: Transmisión de errores en una medida ALS. Todas las unidades lineales están expresadas en cm.

	$\beta$	$\Delta\omega$	$\Delta\gamma$	$\Delta\kappa$	$\Delta\beta$	$\Delta R$	$\Delta X_0$	$\Delta Y_0$	$\Delta Z_0$	Total h=400	Total h=1000
$\Delta X$	0°			0						22.4	53.0
	15°	0	20.9	7.5	0	0	8	0	0	23.6	56.2
	30°			16.1						27.6	66.6
$\Delta Y$	0°					0				26.4	63.5
	15°	20.9	0	0	14	1.3	0	8	0	26.4	63.5
	30°					2.5				26.5	63.6
$\Delta Z$	0°	0			0	5				9.4	9.4
	15°	5.6	0	0	4	5	0	0	8	11.7	19.1
	30°	12.1			8	4				17.0	37.3

A la vista de estos valores se pueden ver errores superiores en la coordenada Y respecto a la coordenada X, debido al error transmitido por la precisión en la medida del ángulo de apertura ( $\beta$ ). También puede apreciarse cómo afecta a la coordenada X los errores provocados en la medida del ángulo  $\kappa$  según aumenta el ángulo de apertura.

Resulta interesante advertir cómo la precisión en la medida de la distancia apenas influye residualmente en la coordenada Z, no afectando casi a las coordenadas planimétricas. Pero lo más sorprendente es ver cómo la altura de vuelo tampoco afecta de manera notable en la precisión de la coordenada altimétrica, sobre todo en ángulos pequeños de apertura. Esto se debe a que depende de la precisión de la medida de la distancia y de la posición altimétrica del sensor y estos parámetros son independientes de la altura de vuelo.

Sin embargo, a esta precisión altimétrica habría que añadirle la influencia del error en planimetría, sobre todo en terrenos con cierta inclinación, ya que en estos casos, el desplazamiento de un punto a lo largo de una ladera también afectará a su cota (figura 156).

Por último, reseñar que la indeterminación en el cálculo de la posición absoluta del sensor (debido a la precisión del sistema GNSS) afecta a las tres coordenadas finales del punto medido.

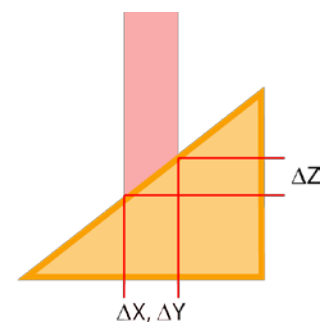


Figura 156: Punto medido sobre ladera.

En la figura 157 se muestra un ejemplo de la precisión alcanzable por el sensor Leica ALS70-HP, suponiendo un error de posicionamiento absoluto GNSS de 5 cm y 40° de apertura del sensor (FOV). Como se puede observar, la precisión altimétrica es superior a la planimétrica, sobre todo cuanto más aumenta la altura de vuelo. Para ambos, cuanto mayor altura de vuelo peor precisión, pero en menor medida para la altimetría. Por otro lado y como es obvio, la precisión en el borde del campo de visión es menor que en el nadir.

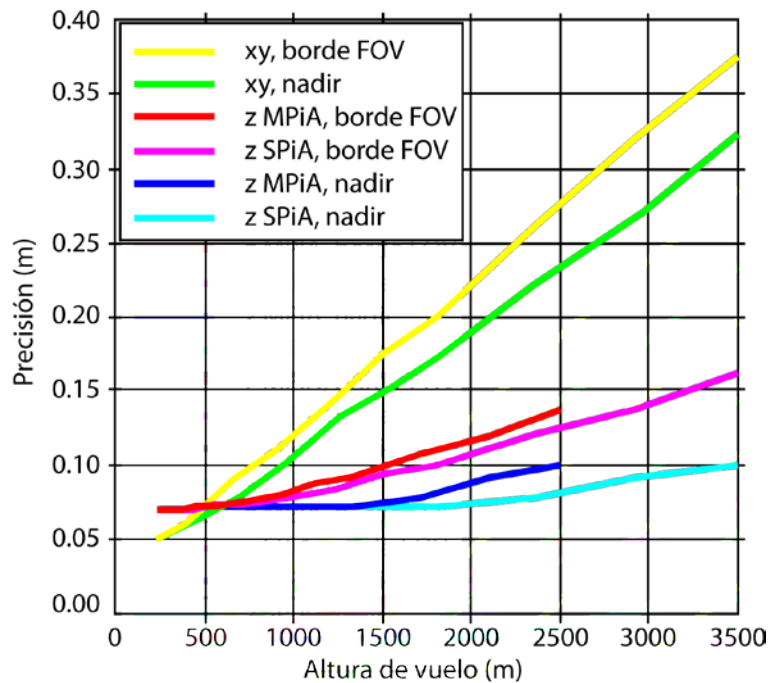


Figura 157: Precisión del sensor Leica ALS70-HP (Leica, 2013).

Como ejemplo, sirvan los valores obtenidos en uno de los ensayos experimentales realizados y que se explica en detalle en el apartado 7.1.1. En él, se registró una zona rústica mediante un vuelo LiDAR para generar cartografía a escala 1/1000 cuyas precisiones exigidas son de 20 cm en planimetría y 25 cm para altimetría. Al final de todo el proceso de edición que se expone en el capítulo 4, se procedió a realizar un control de calidad en campo mediante levantamiento GPS-RTK obteniendo una diferencia de valores en la cota de  $19 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ , tolerables para la escala establecida.

## 3.4. LiDAR terrestre estático

### 3.4.1. Introducción

Tradicionalmente, se ha considerado que la diferencia entre escáneres láser terrestres y aerotransportados es que los primeros permanecen inmóviles durante el proceso de registro. Sin embargo, existen escáneres móviles que también son considerados terrestres. Por tanto, se clasifican como terrestres aquellos escáneres que no están montados sobre un vehículo aéreo (avión, helicóptero, globo, satélite, etc.). Además, existe otra gran diferencia operativa de este tipo de dispositivos y es que, a diferencia de los sensores aerotransportados que sólo miden en una dirección, los dispositivos terrestres deben disponer de un movimiento en dos direcciones para realizar la medición. Sin embargo, los escáneres montados sobre vehículos terrestres (o marítimos) que se desplazan sólo miden en un plano 2D, generando la información 3D por el movimiento del propio vehículo. Además, estos sistemas van equipados con sistemas de posicionamiento GNSS/INS al igual que los sistemas aerotransportados. En resumen, los sistemas terrestres móviles tienen similitudes y diferencias con ambos sistemas, por lo que en este documento se van a tratar de forma independiente, en el apartado 3.5.

La tecnología de escaneado láser terrestre o TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) hace referencia a aquellos escáneres láser estáticos, es decir, que se mantienen en una posición fija durante la toma de datos. Debido a esta falta de movimiento no precisan ir equipados con sensores de posicionamiento GNSS/INS. Al igual que el ALS, sus principales ventajas son la alta precisión y la alta densidad de puntos.

El TLS no está concebido para cubrir áreas extensas, excepto con aquellos modelos que miden a largas distancias, de varios kilómetros, que permiten el registro o monitorización de estructuras relativamente grandes, como puede ser el movimiento de un glaciar o el registro de un asentamiento o ciudad desde una zona elevada. La mayoría de los instrumentos se emplean en otras aplicaciones, como el registro de infraestructuras de ingeniería civil, túneles, edificios, monumentos, plantas de producción, etc. Básicamente, se utilizan para registrar aquellos objetos que se encuentren a una distancia inferior a 100 m con precisión milimétrica, dando una solución de mayor precisión que la fotogrametría de objeto cercano.

Dentro de este tipo de LiDAR, también se incluyen aquellos sensores para el registro de alta precisión y muy corta distancia como los basados en triangulación o interferometría. Con estos sistemas se pueden registrar objetos de pequeño tamaño en el ámbito industrial para su producción, en el ámbito patrimonial para su documentación o conservación, en el ámbito biomédico, etc. Permiten el registro de objetos, normalmente inferiores a algunos metros, con precisiones submilimétricas e incluso de micras. El aspecto físico de estos escáneres difiere de los escáneres topográficos, siendo similares a cámaras o proyectores de luz. Su localización se realiza sobre plataformas, mesas o brazos robotizados, no siendo normal el empleo de trípodes.

Por el contrario, los escáneres láser topográficos están preparados para abordar estacionamientos rápidos. Su construcción se asemeja a la de una estación total topográfica, donde se combina en una única pieza el escáner, el panel de control, el almacenamiento interno, la batería y, en algunos casos, la cámara digital. Los compensadores especiales de doble eje también están integrados de modo que nivelan automáticamente el escáner. Algunos escáneres llevan acoples para receptores GNSS y/o compensadores INS para realizar un posicionamiento y una orientación directa del escáner en el espacio. Además, algunos escáneres integran cámaras digitales y otros proporcionan una montura especial para ellas, dando la posibilidad de añadir información color de alta resolución a las nubes de puntos (Lerma & Biosca, 2008).

La tecnología de escaneado láser se encuentra en constante desarrollo. Los sensores son cada vez más veloces, registrando puntos con mayor precisión y a mayor distancia. El firmware que llevan incorporado permite realizar filtrado de nubes de puntos homogéneos. Incluso, algunos fabricantes están combinando escáneres de medición por pulso (TOF) y de medición por diferencia de fase (CW) en un solo escáner. Además, algunos son capaces de medir diferentes ecos de respuesta e incluso *full-waveform*, al igual que ocurre con los sensores ALS. Por otro lado, las placas de puntería o dianas de referencia pueden acoplar receptores GNSS integrados, evitando la necesidad de tener que registrarlas con estaciones totales.

### 3.4.2. Características técnicas

#### 3.4.2.1. Configuración

Como se ha comentado anteriormente, los dispositivos láser terrestres deben disponer de mecanismos que permitan medir en dos direcciones. Estos mecanismos suelen estar compuestos por espejos rotatorios que se mueven a gran velocidad, permitiendo desviar el rayo láser que sale del emisor. De esta forma, las coordenadas polares registradas estarán compuestas por una distancia y dos ángulos (uno vertical y otro horizontal).

Como ejemplo de funcionamiento, en la figura 158 se muestran los componentes de un escáner láser terrestre de Riegl. El movimiento del escáner verticalmente se denomina “*line scan*” y el horizontal, “*frame scan*”. El desvío vertical del haz láser (1) se realiza mediante el empleo de un polígono rotante (2), que está oscilando

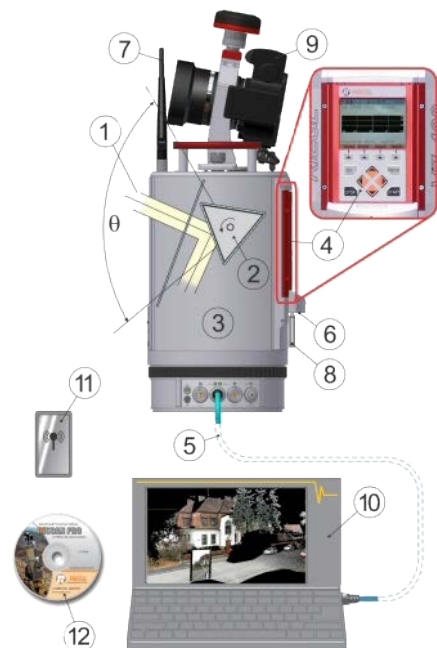


Figura 158: Principio de operación de un LiDAR terrestre (Riegl VZ-400).



constantemente y cuya velocidad es ajustable para variar la frecuencia de muestreo o el ángulo  $\theta$  de escaneado, hasta un máximo de  $100^\circ$ . Si la frecuencia elegida es baja o el ángulo de escaneado es pequeño, el espejo oscila de arriba abajo. El movimiento horizontal se realiza rotando todo el sistema (3) a lo largo de los  $360^\circ$ . En este modelo, el almacenamiento de los datos (distancia, ángulos horizontal y vertical, intensidad y tiempo) se realiza en una unidad conectada a un puerto USB (8) o directamente a un ordenador (10) conectado mediante TCP/IP (5). En otros modelos, el almacenamiento se realiza en una memoria interna del escáner o en tarjetas de almacenamiento extraíbles. Este modelo lleva un cámara óptica (9) incorporada y sus datos se almacenan junto con los datos del escáner. Además, tiene la posibilidad de controlar la unidad mediante un teclado y pantalla (4) integrada o vía *Wireless* (7) con un dispositivo móvil (11) como puede ser un teléfono móvil, una tableta o un ordenador (Riegl, 2013).

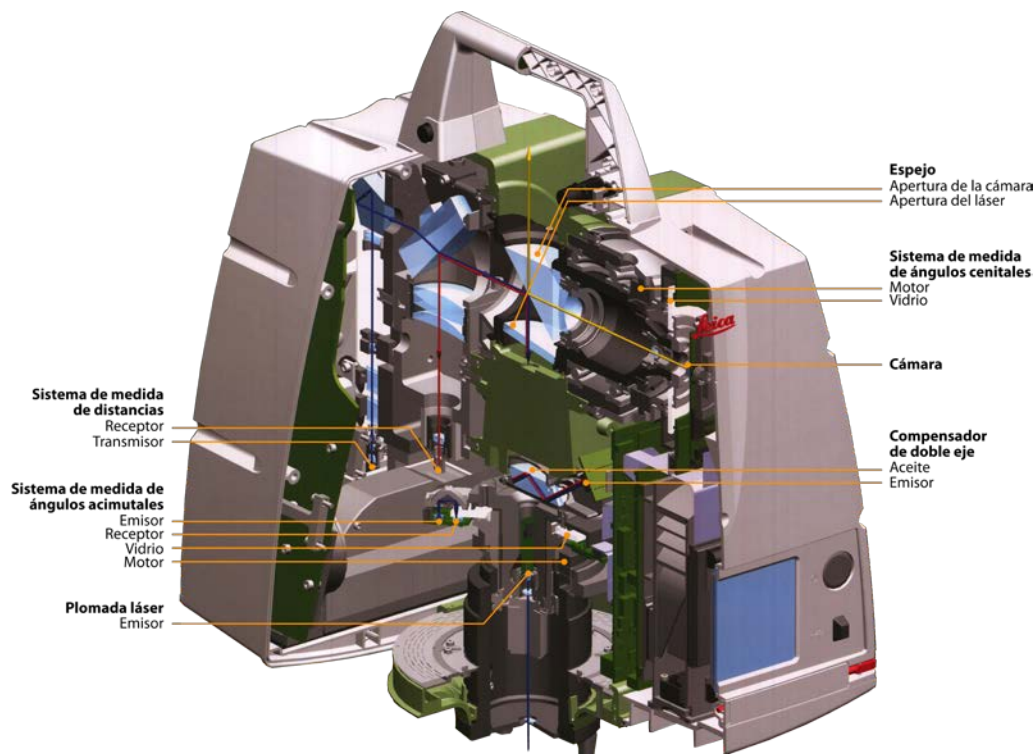


Figura 159: Corte mostrando la construcción del Leica ScanStation C10 (Leica, 2013).

### 3.4.2.2. Obtención de la medida

Normalmente, en los levantamientos láser terrestres, los objetos se registran desde varias estaciones, produciéndose un pequeño solape entre las nubes de puntos registradas desde cada estación. Cada nube de puntos registrada desde estaciones diferentes se denomina “escaneado”. Por tanto, se deberán referenciar estos estacionamientos entre sí para obtener las nubes de puntos respecto del mismo sistema de referencia. De hecho, el mayor problema en el registro un objeto en 3D, es la obtención de los parámetros de transformación para calcular las coordenadas en un único sistema de referencia a partir del sistema de referencia del escáner (Bornaz & Rinaudo, 2004).

De esta forma, las coordenadas de un punto medido por el sistema vendrían dadas por la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + R_{\omega\phi\kappa} \cdot \begin{pmatrix} D \sen V \cos H \\ D \sen V \sen H \\ D \cos V \end{pmatrix}$$

Siendo  $D$  la distancia medida por el sensor láser,  $H$  el ángulo horizontal desde el origen de rotación, es decir, acimut,  $V$  el ángulo cenital respecto de la vertical,  $X_0Y_0Z_0$  las coordenadas de la estación en el sistema de referencia elegido y  $R_{\omega\phi\kappa}$  la matriz de rotación entre el sistema de medida del escáner y el sistema de referencia.

Para ello, el proceso de registro puede ser directo o indirecto y se puede abordar utilizando diferentes tipos de entidades: dianas, puntos de la propia nube de puntos, puntos topográficos (obtenidos mediante topografía clásica o GNSS), etc.

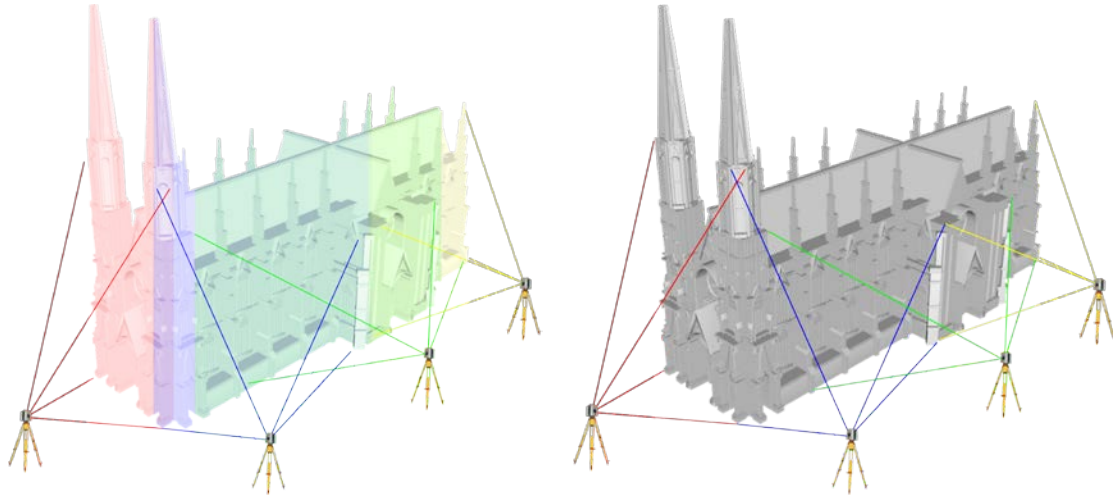


Figura 160: Proyecto de registro mediante TLS. En gabinete, se tendrá que proceder a la unión de las diferentes nubes de puntos.

La georreferenciación directa supone que se han determinado las coordenadas de posicionamiento del escáner mediante alguna otra técnica geomática, así como los ángulos de orientación respecto de un sistema de coordenadas cartesiano único para el proyecto. Esta técnica no requiere solape entre los escaneados, aunque se aconseja para evitar huecos.

Por el contrario, en la georreferenciación indirecta no se conocen las coordenadas del punto estación ni los ángulos de orientación, por lo que deben calcularse a partir de puntos de control. Por ello, en cada estacionamiento se debe asegurar que se pueden medir varios puntos de control que permitan relacionar los diferentes escaneados. Cada escáner permite reconocer marcas o placas específicas de puntería almacenadas en su memoria interna que son identificadas por su forma y alta reflectancia. Estas placas son colocadas en lugares visibles desde varios estacionamientos, es decir, en las zonas de solape, debiendo permanecer fijas durante todo el trabajo. Una vez identificadas, suelen remedirse con mayor resolución

para poder determinar su posición con mayor precisión. Existen marcas de puntería planas con rotación para que el plano sea perpendicular a la dirección de registro o basadas en cuerpos visibles de la misma forma desde cualquier punto de vista como esferas o cilindros. Para poder realizar la georreferenciación, se necesitarán al menos tres puntos de control medidos desde cada estación.



Figura 161: Diferentes modelos de señales de puntería o dianas y accesorios para fijarlas y orientarlas.

Adicionalmente, se podría realizar la georreferenciación sin utilizar placas de puntería o dianas. En este caso, para poder relacionar los diferentes escaneados, se utilizan los puntos medidos sobre los objetos en las zonas de solape. Para ello las aplicaciones utilizan el algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) que permite identificar puntos homólogos en dos nubes de puntos diferentes, aproximadamente orientadas. Como indica su nombre, el algoritmo trabaja de forma iterativa ajustando los puntos homólogos mediante el cálculo por MM.CC. utilizando estimadores robustos para minimizar las diferencias entre las coordenadas, hasta alcanzar un umbral deseado.

Se pueden conseguir mejores precisiones con la georreferenciación indirecta que con la directa. De hecho, se pueden alcanzar mayores precisiones sin utilizar placas de puntería, ajustando por MM.CC. las zonas de solape. Además, supone un ahorro significativo de trabajos adicionales de georreferenciación, que conlleva menores costes económicos.

### 3.4.2.3. Calibración

Por otro lado, estos sistemas también sufren de errores sistemáticos debido a imperfecciones en su construcción. Sus efectos pueden corregirse, añadiendo correcciones a las ecuaciones de medición. Por ello, se requiere un proceso de calibración que estime los valores de los coeficientes del modelo. Existen dos posibilidades: proponer un modelo basado en las medidas topográficas o un modelo empírico. El primer modelo establece las correcciones a todas las medidas realizadas por el sistema: la distancia y dos ángulos. El segundo modelo calcularía unos coeficientes empíricos en base a repetición de medidas sobre superficies de características conocidas. En cualquier caso, se podría realizar una auto-calibración basada en el ejemplo fotogramétrico, en la que, basándose en una alta redundancia de observaciones, se calculen los parámetros de calibración del modelo elegido. Este proceso de auto-calibración podría estar basado en la observación de un conjunto de

marcas de puntería de coordenadas conocidas colocadas en una amplia distribución del campo visual del escáner y medidas desde distancias y puntos de vista diferentes.

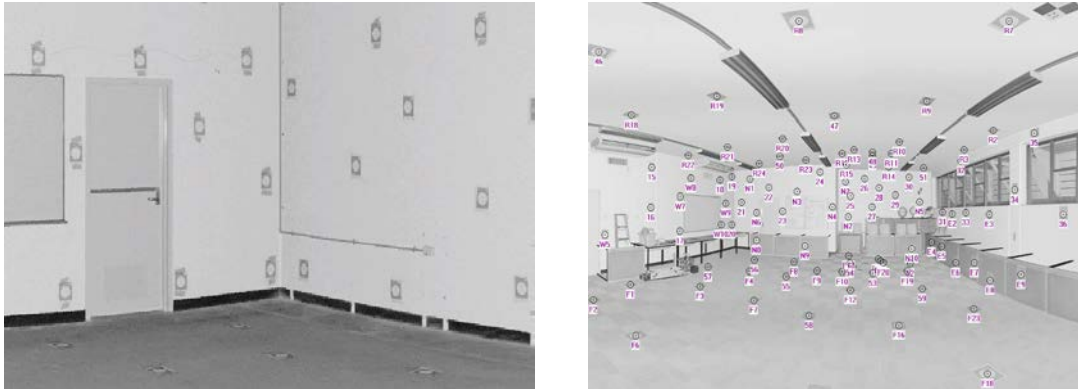


Figura 162: Posible distribución de marcas de puntería para calibración de escáner TLS.

### 3.4.3. Productos generados

Estos sistemas permiten el registro tridimensional de objetos mediante mediciones a cortas y medias distancias. El resultado de este registro tridimensional es una densa nube de puntos sobre toda la superficie registrada, gracias a las mediciones realizadas desde varios puntos de vista. Esto permitirá calcular un modelo digital tridimensional preciso de todo el objeto. De hecho y como se verá en capítulos posteriores, estos modelos no pueden ser generados utilizando algoritmos de triangulación, reservados para situaciones donde los puntos se mueven sobre un plano (con una diferencia altura), generando modelos conocidos como 2.5D, propios de registros aéreos. En este caso, se emplean algoritmos que calculan primitivas tridimensionales para relacionar los puntos próximos, como son los tetraedros que generarán tetraedrizaciones.

A partir de estos modelos, resulta sencillo posteriormente extraer datos derivados como secciones derivadas de cortes de dirección arbitraria, cálculo de superficies exteriores, cálculo de volúmenes, etc.

Por otra parte, los sistemas láser terrestres suelen llevar sensores ópticos de baja resolución para capturar la respuesta multispectral del objeto medido. Adicionalmente, se pueden integrar datos multispectrales registrados mediante otros sensores (cámaras compactas o réflex). Con ello, se puede generar un modelo digital texturizado cuya representación resulta más próxima a la realidad. Con este conjunto de datos, se amplía el abanico de posibilidades de productos generados puesto que se podrán calcular ortofotografías rectificadas a planos de posición arbitraria. Hay que recordar que el registro en TLS se realiza tridimensionalmente, por lo que no sólo hay un plano de rectificación de imagen como ocurría en el caso aéreo.

Por último, advertir que se pueden realizar recreaciones de realidad virtual que ayudarán en la representación e identificación de detalles del objeto medido. Estas

recreaciones podrán ser imágenes estáticas o videos realizando un movimiento alrededor del objeto.

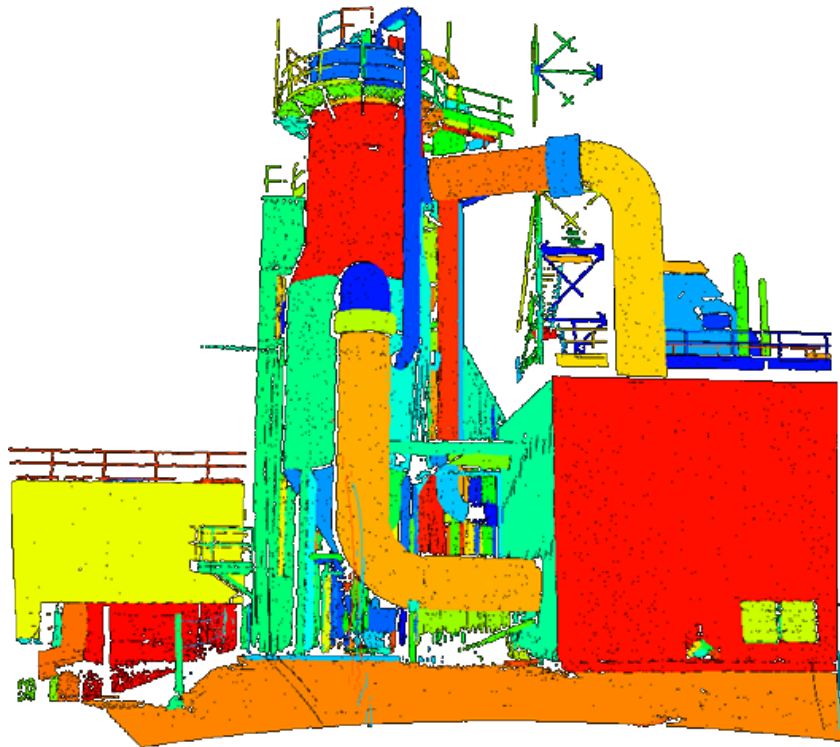


Figura 163: Registro mediante TLS de una planta industrial.

### 3.4.4. Aplicaciones

El rango de aplicaciones del láser escáner terrestre es muy amplio, pudiendo obtener modelos geométricos texturizados, pues muchos de los sistemas TLS incluyen una cámara óptica. Se pueden utilizar en levantamiento topográfico en general, como si de una estación total se tratara pero registrando, obviamente, una gran cantidad de información. Con algoritmos de reconocimiento de objetos, posteriormente se pueden sustituir muchos puntos por el objeto medido. Son de gran utilidad en levantamientos mineros y subterráneos, donde sólo pueden utilizarse estaciones totales. Sin embargo, al contrario que estas últimas, no necesitan iluminación para registrar las características de la cavidad ni sus elementos. Por otro lado, también se están utilizando para registrar zonas que sensores ALS no han podido cubrir por ocultaciones o inaccesibilidad, completando la nube de puntos (Rönnholm, et al., 2009).

También se utilizan en ingeniería civil, para la auscultación, documentación y control dimensional y estructural de presas, viaductos y otras obras de fábrica. Asimismo, se pueden utilizar para el registro de vías de comunicación (carreteras, vías férreas, taludes, estructuras...) y todos los elementos que en ellos se encuentran como señales de tráfico, quitamiedos, catenarias, raíles, etc.

Actualmente, son una herramienta imprescindible para la documentación de elementos arquitectónicos y edificaciones, pudiendo registrar todos los pequeños detalles que aparecen en sus fachadas (English Heritage, 2009). También son utilizados en el interior de edificios o plantas industriales e instalaciones, pudiendo registrar todos los elementos de maquinaria que en ellas se encuentran: tuberías, engranajes, grúas, máquinas de montaje, etc.

También han supuesto un gran avance en el registro, documentación y monitorización patrimonial, siendo muy utilizado en proyectos arqueológicos, registrando desde antiguos asentamientos humanos hasta monumentos, obras de arte, hallazgos paleontológicos, petroglifos u otros objetos. Sus ventajas residen en la alta precisión obtenida sin necesidad de manipular los objetos, lo que permite un modelado objetivo para su utilización en estudios de conservación, reconstrucción o divulgación científica (Rubio, et al., 2009).

Por último, con la incorporación del registro “*full-waveform*” se están utilizando en aplicaciones forestales para el registro, identificación y documentación de especies forestales, trabajando de forma combinada con sensores ALS (Doneus, et al., 2010).

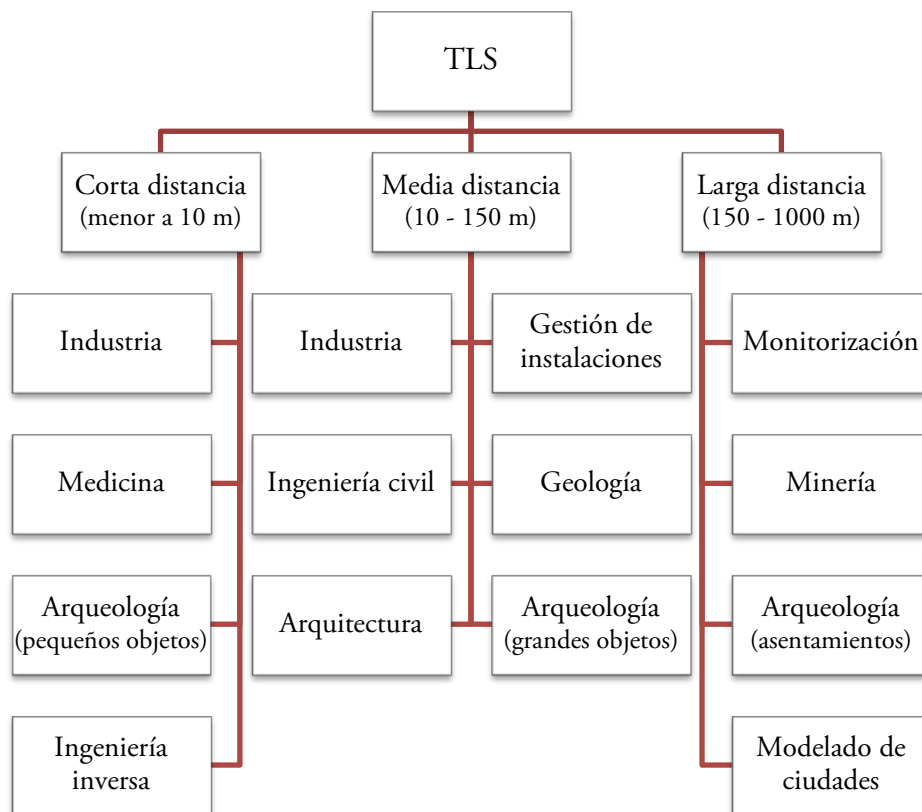


Figura 164: Aplicaciones de TLS en función del alcance del escáner.



## 3.5. LiDAR terrestre móvil

### 3.5.1. Introducción

Los sistemas de cartografía móvil (MMS, *Mobile Mapping System*) se han desarrollado lentamente en los últimos 25 años, sobre todo en los centros de investigación académica. De hecho, el primer sistema fue desarrollado por la Universidad de Ohio en 1990 y, en su creación, sólo llevaba dos cámaras y una antena GPS instalados en un coche. Sobre este desarrollo, se introdujeron posteriormente sistemas inerciales y, más recientemente, sistemas de medición LiDAR. Este hecho ha acuñado el término MLS (*Mobile Laser scanning System*) o LiDAR móvil.

Más recientemente, han surgido una serie de sistemas de orientación comercial, la mayoría de ellos para la recogida de datos sobre infraestructuras de vías de comunicación o de fachadas. Sin embargo, en los últimos tres años, algunas grandes empresas como Google, TeleAtlas y Navteq han adoptado la tecnología a gran escala, introduciendo flotas de vehículos de cartografía móvil para sus operaciones de registro de imágenes y cartografía (Petrie, 2010). Esto ha favorecido el rápido desarrollo de esta tecnología que ahora se puede considerar como madura y contrastada. La demanda ha crecido hasta el punto de que existen varios proveedores de estos sistemas que ofrecen productos para satisfacer a este particular mercado.

En la actualidad, hay dos categorías principales, diferenciadas por el uso previsto del producto y las especificaciones de precisión que deben tener. Por un lado, están los sistemas que están siendo utilizados para la adquisición de imágenes digitales cuyo fin es la visualización de imágenes a nivel de calle y para aplicaciones de navegación. Por otro lado, están los sistemas que se utilizan para recopilar datos sobre las infraestructuras viarias y ferroviarias que se precisan en proyectos de ingeniería, mantenimiento y gestión. Obviamente, los requisitos de precisión de los datos del mapa que tienen que ser medidos son sustancialmente diferentes en cada caso, ya que la segunda categoría, por lo general, resulta mucho más exigente.

### 3.5.2. Características técnicas

La composición de este tipo de sistemas incluye el montaje conjunto de tres dispositivos diferentes: el sistema de grabación digital de imágenes, el sistema de barrido láser (LiDAR) y el sistema de georreferenciación (GNSS/INS). Adicionalmente, la mayoría de sistemas MMS incorporan un sistema medidor de la distancia en la rueda (DMI) u odómetro. Es necesario realizar una calibración precisa para alinear geométricamente los sensores de posicionamiento y los sensores de registro. Además, es necesario sincronizar las medidas realizadas por cada uno de ellos, ya que funcionan con frecuencias muy diferentes. Para ambas operaciones, se utiliza software específico (Puente, et al., 2009). En el apartado 9.2.B.4, se detallan los principales sistemas MMS y sus componentes.

A continuación, se analizan cada uno de estos dispositivos.

### 3.5.2.1. Sistemas formadores de imagen

Debido a la velocidad de movimiento de los MMS y a la proximidad de los objetos, no se utilizan las cámaras digitales de línea habituales en el registro de imágenes aéreas para cartografía, sino que se utilizan las cámaras digitales de área. Estas cámaras tienen tamaños de formato muy pequeños (de 1 a 2 megapíxeles) aunque el futuro tiende a formatos de 5 megapíxeles, con velocidades altas (de 5 a 15 fotogramas por segundo) y tiempos de exposición muy cortos (para eliminar la borrosidad de la imagen). Se utilizan conjuntos con varias cámaras de video CCD o CMOS que proporcionan panorámicas, algunas de ellos con 360° de cobertura.

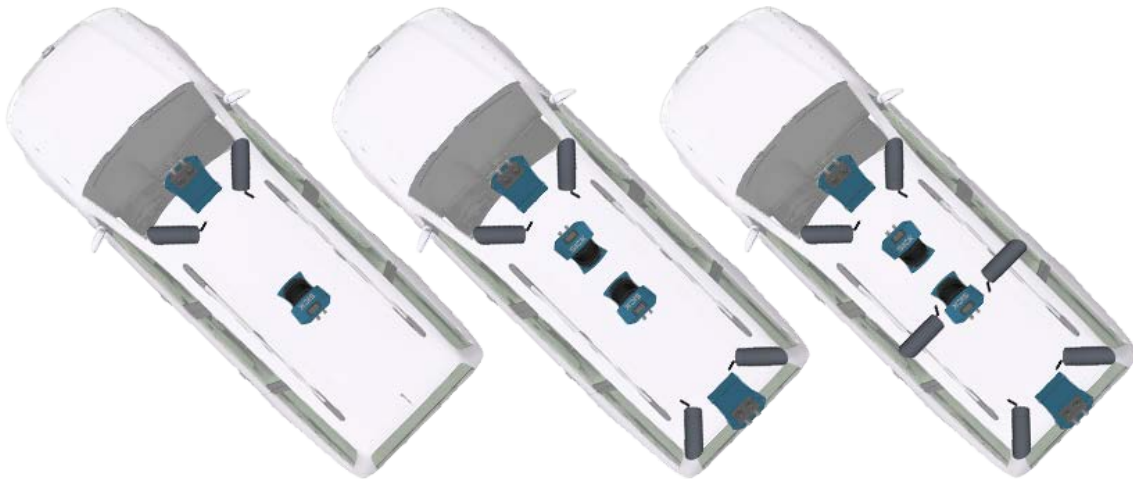


Figura 165: Diferentes configuraciones de cámaras digitales y escáneres láser utilizadas por Mitsubishi.

Sin embargo, lo más frecuente es el uso de unidades totalmente integradas de múltiples cámaras. Estos modelos montan varias cámaras digitales que producen una imagen panorámica de 360° y pueden estar acopladas sobre un mástil sobre el techo del vehículo. Una de las más utilizadas (por Topcon y Trimble) es el modelo Ladybug de la empresa canadiense Point Grey Research, que integra seis cámaras generando imágenes de hasta 5 megapíxeles a 10 FPS (figura 168). Otra unidad integrada de múltiples cámaras es el modelo Dodeca 2360 de la también canadiense Immersive Media Corporation Inc. (IMC), que utiliza once cámaras de pequeño formato que generan una imagen compuesta de 2400 x 1200 píxeles (figura 166). Por otro lado, la empresa Google utiliza las cámaras Ephel Eysis compuestas de nueve cámaras CCD para su servicio Street View, que pueden generar imágenes de 5 megapíxeles a 5 FPS (figura 167).



Figura 168: Modelos Ladybug3 de 2 megapíxeles cada cámara y 15 FPS (izquierda) y Ladybug5 de 5 megapíxeles cada cámara y 10 FPS (derecha).

Figura 166: IMC Dodeca 2360.

Figura 167: Ephel Eysis.

### 3.5.2.2. Sensor láser

Los conocidos y contrastados escáneres láser 3D terrestres utilizados en topografía han tenido escasa representación en los MMS. De hecho, estos escáneres láser sólo se pueden utilizar para mediciones estáticas, incluso cuando se montan sobre un vehículo, ya que la operación de escaneado necesita varios minutos. No obstante, existen algunos escáneres láser 3D, de las empresas FARO, Leica y Z+F, que han sido utilizados en MMS, pero deshabilitando el movimiento horizontal, convirtiéndose en escáneres láser 2D.

De hecho, los MMS utilizan los escáneres láser en 2D por su gran rapidez para adquirir perfiles o medir distancias en un plano 2D único. Estas mediciones se llevan a cabo en una serie de sucesivos planos paralelos que intersectan con carreteras, aceras, mobiliario urbano, edificios o vegetación que se encuentran a lo largo de la trayectoria que sigue el vehículo. Por ello, en muchos aspectos, este funcionamiento es muy similar a los escáneres láser aerotransportados, exceptuando la distancia a la que se encuentra el objeto. Al igual que en el caso aerotransportado, la tercera dimensión se crea a partir del movimiento del vehículo en que se monta el escáner láser. La ubicación de cada perfil que se está midiendo continuamente (y con mucha precisión) se consigue mediante un conjunto integrado de dispositivos de posicionamiento (GNSS, IMU y un odómetro) cuando el vehículo se desplaza.



Figura 169: Principio operativo de los láser escáner 2D montados en MMS.

Uno de los escáneres láser 2D más utilizado en MMS es el modelo LMS-291 fabricado por la empresa alemana SICK. También es muy utilizado el sensor de alta definición Velodyne HDL-64E. Otros sensores son fabricados por proveedores especializados como Riegl y Optech, ampliamente conocidos por sus escáneres láser aerotransportados y terrestres para topografía y cartografía. En términos generales, estos últimos equipos ofrecen mayores alcances, velocidades más rápidas y mayor precisión de la medición de los objetos que los escáneres láser SICK, pero son considerablemente más

costosos. Además de suministrar escáneres 2D, Riegl también ha desarrollado su propio MMS. Por el contrario, Optech no suministra su escáner por separado de su MMS.

### 3.5.2.3. Dispositivos de georreferenciación

Para la determinación de la posición absoluta del MMS y sus unidades de registro de imagen y escáner láser, el dispositivo principal es un receptor GNSS de calidad geodésica. Hay una amplia oferta de receptores GNSS posibles en el mercado de Trimble, Topcon, Leica, Novatel, Javad, etc., que pueden registrar con calidad los datos de posición. Habitualmente, se emplea el modo diferencial con un segundo receptor. Sin embargo, los MMS suelen trabajar en zonas urbanas con edificios, vegetación alta o túneles, pudiendo dar lugar a geometrías débiles de la constelación de satélites e incluso perder la señal. Por ello, suele ser habitual integrar un sistema de navegación inercial (INS) y un DMI u odómetro instalado en una de las ruedas (u otro instrumento de medición de distancia) para proporcionar información adicional de la posición.

Los INS utilizan sensores IMU para calcular la posición y velocidad de movimiento del vehículo. Existe un gran número de dispositivos de IMU que pueden generar un flujo continuo de datos de posición y orientación cuando las señales GNSS por satélite no están disponibles. Según los objetivos de precisión y precios del sistema MMS, se utiliza una tecnología u otra. En el apartado B.5, se explican brevemente detalles técnicos de los diferentes tipos de IMU, así como de algunos modelos comerciales.

Al igual que en el caso aéreo, los datos de georreferenciación del vehículo se consiguen mediante un sistema de posición y orientación (POS) que controla el receptor GNSS y los datos INS, procesándolos mediante filtros Kalman. Los datos GNSS eliminan el error debido a la deriva propia del sistema inercial, mientras que los datos INS reducen los errores GNSS y mantienen una solución válida de navegación en los momentos en los que se pierda la señal de los satélites. Además, el POS permitirá utilizar los datos generados por el DMI que constantemente está midiendo la distancia recorrida.

La precisión de medida del láser es de unos pocos centímetros por lo que la precisión absoluta de los puntos medidos dependerá en gran medida de los cálculos realizados por el POS. Por ello, para calcular la trayectoria correcta del vehículo, el sistema MMS deberá permanecer estático cinco minutos antes y después del trabajo para asegurar el perfecto alineamiento entre el INS y la posición GNSS. A pesar de estas necesidades de precisión, algunos sistemas permiten calcular los puntos en tiempo real, utilizando la antena GNSS en RTK con una estación de referencia cercana.

### 3.5.3. Productos generados

A partir de los datos registrados por los diferentes sensores que equipan los MMS se pueden obtener numerosos productos, obviamente relacionados con las vías por las que está circulando el dispositivo MMS.

Gracias a las mediciones realizadas por los sensores láser, el producto más demandado es el modelo digital de la superficie de la vía (DRSM). La precisión de este modelo es de orden centimétrico, por lo que podrá ser útil para trabajos de control o mantenimiento de las vías. Lógicamente, gracias a este DRSM se podrán obtener perfiles longitudinales o transversales a la densidad deseada a posteriori.

Al incorporar cámaras digitales (o video en algunos casos) se podrán obtener igualmente imágenes georreferenciadas que permitirán inspeccionar visualmente la vía y todos sus elementos de forma rápida. Estas imágenes mejoran el DRSM ya que se podrán aplicar como texturas, aumentando su utilidad.

Además de registrar geométrica y radiométricamente la vía, se registran otros objetos aledaños que podrán ser representados por objetos almacenados en librerías específicas, por lo que se podrán construir modelos de ciudad 3D con detalles incluso de los edificios a pie de calle. Esta información no es recogida por sensores aéreos y sería lenta con sensores terrestres estáticos.

### 3.5.4. Aplicaciones

Los sistemas MMS suelen utilizar un vehículo terrestre, normalmente un automóvil aunque también puede ser un vehículo sobre raíles. Por ello, las principales aplicaciones de estos sistemas son todas aquellas relacionadas con este tipo de vías, por ejemplo, inventario de objetos, generación de bases de datos con las redes viarias o mantenimiento, control e inspección de las vías. La ventaja fundamental de esta técnica de recogida de la información con respecto a otras es la velocidad de proceso y medición con una gran precisión, ya que se mide in situ, sin tener que interrumpir el tráfico, puesto que se puede recorrer la vía a una velocidad de 70 km/h. Gracias a esta velocidad de obtención de la información, se pueden plantear actualizaciones periódicas, como puede ser el seguimiento y control de una obra de ingeniería de grandes dimensiones.

En cuanto al inventario de objetos, las aplicaciones informáticas proporcionan librerías para la identificación de señales de tráfico, elementos de iluminación, quitamiedos, cables, catenarias, torres y puentes. Esto permitirá su inclusión en bases de datos que facilitará las labores de mantenimiento y control de estas vías.

A menudo es necesario el control dimensional de la superficie de la vía, incluyendo los raíles si se trata de ferrocarril. Suele utilizarse incluso en el momento de la construcción para tener datos de progreso o posible deformación. Estos datos podrán generar un modelo digital de la superficie de la vía (DRSM). Sin embargo, las precisiones alcanzadas por los

modelos MMS convencionales no son suficientes para un control en detalle. Por ello, existen montajes excepcionales que utilizan dos sensores LiDAR aumentando la precisión.

### **3.5.5. Sistemas móviles en interiores**

Aprovechando la tecnología desarrollada para ser instalada en vehículos en movimiento, últimamente se han presentado modelos de sistemas móviles adaptados para ser transportados a pie. Estas soluciones están pensadas para aquellas situaciones donde no es posible acceder por ningún otro sistema (incluso sin posibilidad de comunicación GNSS) y se requiere la recogida de gran cantidad de información, por ejemplo, en el caso del registro de interiores: industrias, túneles, aeropuertos o estaciones de tren, grandes espacios públicos cerrados (teatros, auditorios), zonas peatonales, etc.

El resultado de estos registros es un conjunto de datos en el mismo sistema donde quedarán representados los límites de la zona (paredes, techos, bóvedas) y todos sus accesorios (mobiliario, escaleras, puertas), permitiendo realizar planos de gran calidad útiles para documentación patrimonial, arquitectónica o industrial.

Estos sistemas suelen estar compuestos por un sistema de barrido láser 2D más un sistema inercial INS y, opcionalmente, un sistema de cámaras 360°. No incorporan antena GNSS, puesto que en estos espacios no existe cobertura. Son sistemas más asequibles que los MMS de automóvil, permitiendo reducir costes en la fase adquisición de información. En el apartado B.4, se han descrito algunos modelos comerciales.



## 3.6. Análisis comparativo con otros sistemas de registro

### 3.6.1. Introducción

En este apartado, se realiza una comparación entre las técnicas de registro LiDAR con otras técnicas de registro geométrico detalladas en el capítulo 2. Con ello, se pretenden ver las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas en función del tipo de proyecto. La experiencia permite asegurar que no son técnicas excluyentes y la mejor solución suele venir de la combinación de algunas técnicas. No obstante y gracias a las precisiones alcanzadas, rendimiento y relación producto/precio, en el registro de información geométrica parece que son dos las técnicas que dominan la mayor parte de los proyectos: fotogrametría y LiDAR. Sin embargo, viendo la progresión de la tecnología quizás se pudiera pensar en un futuro marcado por sensores (pasivos y activos) transportados en satélite.

### 3.6.2. Técnicas topográficas clásicas

A pesar del avance tecnológico introducido en las estaciones totales topográficas, como pueden ser las estaciones motorizadas, medida sin necesidad de prisma, control remoto (mediante *WiFi*, *Bluetooth*, GSM), la toma de datos mediante técnicas topográficas clásicas es excesivamente lenta, presentando bajos ratios de productividad. Permiten obtener puntos con precisión milimétrica pudiendo seleccionar los puntos que se miden pero dependen de unas mínimas condiciones de luz para poder identificar los puntos ópticamente. Además, precisan mayor complejidad en trabajos topográficos para georreferenciar los datos tomados a un mismo sistema de referencia. Por tanto, no suponen un rival para los sistemas de registro láser, los cuales consiguen casi las mismas precisiones con densidades inalcanzables.

Existen estaciones topográficas que se pueden configurar para que midan una malla de puntos pero con velocidades muy bajas de hasta 15 puntos por segundo. A su favor está la inversión de los instrumentos, ya que la estación más precisa (submilimétrica) tiene un precio inferior a 30 mil euros.

Por tanto, las técnicas topográficas sólo serán utilizadas para dar coordenadas a estaciones o puntos de apoyo que permitan georreferenciar datos tomados posteriormente, como pueden ser nubes de puntos LiDAR o imágenes multiespectrales. Esta utilidad será imprescindible en aquellos lugares donde no sea posible transferir coordenadas mediante otro método como pueden ser túneles, cuevas o interiores de edificios, ya que, en estos casos, no se pueden utilizar receptores GNSS. Además, serán necesarias para dar coordenadas sobre elementos verticales como las fachadas de los edificios puesto que tampoco es posible utilizar dichos receptores. También serán útiles para completar la medición en zonas complicadas que no hayan podido ser registradas mediante otro método.

### 3.6.3. Técnicas GNSS

Los receptores GNSS suponen un notable avance en la productividad respecto a las técnicas topográficas clásicas. Mediante posicionamiento RTK, se puede registrar un punto con precisión centimétrica cada 5 segundos, lo que permitiría su utilización para registrar pequeñas zonas con rendimientos aceptables. Sin embargo, no pueden ser utilizados en zonas bajo cubierta (interiores de edificios, túneles, zonas arboladas, etc.) o para realizar registros de objeto cercano, donde es necesario dar puntos sobre paramentos verticales y con ocultaciones de un cielo despejado.

En la mayoría de los proyectos son necesarios dos receptores para trabajar en modo diferencial. El precio de los receptores es superior al de una estación total. Suelen ser imprescindibles para dar coordenadas absolutas a estaciones o puntos de apoyo cuando existe cielo despejado. También resultan de gran ayuda como estaciones de referencia para sistemas de registro móviles equipados (aerotransportados, en automóvil) con sistemas de posicionamiento GNSS/INS. Al igual que ocurre con las técnicas topográficas clásicas, para la mayoría de los proyectos, no parecen ser una alternativa tan eficiente comparado con los sistemas de registro láser.

### 3.6.4. Técnicas fotogramétricas

Como se describió en el apartado 2.4, la fotogrametría permite la reconstrucción tridimensional de un objeto registrado desde, al menos, dos fotografías. Cada fotografía está definida por un haz de rayos por lo que se puede situar un punto en el espacio tridimensional si es el producto de la intersección de dos rayos pertenecientes a otras tantas fotografías. Estos rayos, generados por la luz (natural o artificial), son registrados por sensores pasivos. La reconstrucción tridimensional puede mejorar con el registro de más fotografías del objeto y podrá realizarse de forma asistida por un usuario experimentado en restitución fotogramétrica o de forma automática mediante algoritmos basados en correlación de imágenes. Estas imágenes podrán estar georreferenciadas en el momento de la toma mediante el empleo de sistemas de posicionamiento GNSS/INS o podrán georreferenciarse a posteriori mediante la medida de puntos de apoyo de coordenadas conocidas en el objeto. Si se trata de fotogrametría de objeto cercano, se utilizan cámaras no métricas más accesibles por los usuarios no experimentados.

En fotogrametría, el proceso se puede dividir en cuatro fases: la adquisición de imágenes, el procesado de las imágenes, el calibrado y orientación de dichas imágenes y la medición sobre las imágenes para la extracción de los datos tridimensionales.

Por otro lado, los sistemas LiDAR permiten la reconstrucción tridimensional de un objeto, necesitando únicamente la medida desde un punto de vista. Esta medida se realiza mediante coordenadas polares, es decir, un ángulo y una distancia medida por el sensor láser. Sin embargo, para georreferenciar estas medidas en un sistema de coordenadas cartográfico es imprescindible la utilización de sistemas de posicionamiento GNSS/INS. De

hecho, la precisión en las coordenadas del punto medido dependerá en gran medida de la sensibilidad de estos sensores.

Empleando equipos LiDAR, el proceso podría ser dividido en dos fases: la adquisición de los datos y la edición y unión de las nubes de puntos 3D.

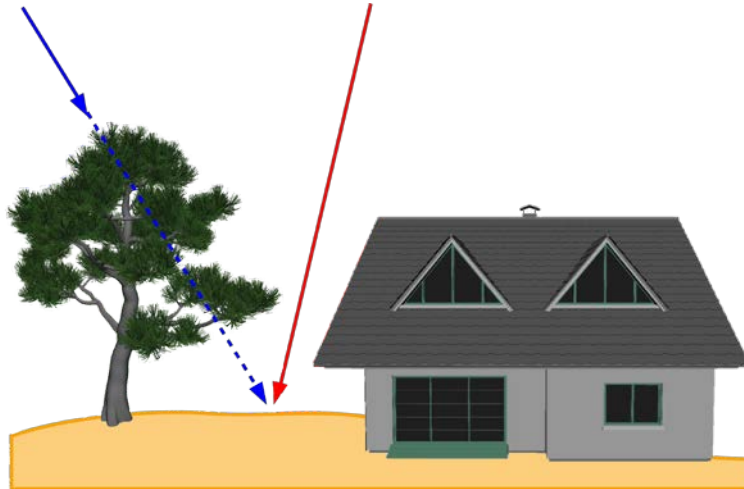


Figura 170: Ventaja del LIDAR sobre la fotogrametría a la hora de tomar puntos del suelo cerca de objetos con volumen. LiDAR: un solo rayo (rojo). Fotogrametría: mínimo dos rayos (azul y rojo).

Según estos principios básicos se pueden deducir algunas ventajas e inconvenientes como comparación de ambos sistemas (Baltsavias, 1999).

Una de las principales ventajas que tienen los sistemas LiDAR, tanto aéreos como terrestres, es la inmediatez de datos tridimensionales, ya que miden distancias directamente que, combinados con los datos de posicionamiento GNSS/INS, pueden convertirse fácil y rápidamente en coordenadas 3D. En fotogrametría, se precisa un post-proceso de los datos tomados para convertir las imágenes en información tridimensional. Este post-proceso precisa de software específico y, en la mayoría de los casos, usuarios experimentados. En el caso de LiDAR aéreo, se precisa software de tratamiento sobre todo si se desea clasificar la información registrada. En caso de registro terrestre, las aplicaciones LiDAR son más sencillas y rápidas. Por tanto, el LiDAR es la técnica más óptima para aplicaciones de respuesta rápida como evaluación de desastres naturales, accidentes de tráfico o cuando el área es pequeña y son necesarios datos de alta resolución.

En zonas donde existen ocultaciones debido a la perspectiva y a objetos con volumen, como pueden ser zonas edificadas o con vegetación, el LiDAR es muy superior a la fotogrametría puesto que permite la medida de puntos a partir de un único punto de vista. Para poder ser restituído fotogramétricamente, se registra al menos desde dos fotografías, caso bastante complicado debido al abatimiento de los objetos con altura. En zonas urbanas, aunque se registraran los puntos en dos fotografías, los algoritmos de correlación de imágenes dan malos resultados por la diferente perspectiva que se muestra en cada una de ellas. Esta ventaja también se da en fotogrametría de objeto cercano, puesto que los objetos como monumentos o fachadas arquitectónicas tienen numerosos salientes y

entrantes, produciéndose muchas ocultaciones difícilmente registrables con dos tomas fotográficas (Baltsavias, 1999).

En zonas con vegetación, el LiDAR no registra la información multiespectral (a veces, imprescindible) pero tiene la ventaja añadida de registrar diferentes ecos de respuesta del pulso enviado. Es decir, el pulso láser enviado puede reflejar sobre la copa de los árboles pero también puede atravesar el follaje, pudiendo llegar incluso hasta la superficie del suelo. Esto permitirá generar el MDT de la zona con el último pulso, por lo que se convierte en la mejor opción para muchas aplicaciones. Además se podrá generar el MDS con el primer pulso y, con ambos modelos, se podrán calcular modelos de vegetación. Además, no sólo se podrá registrar la posición del suelo desnudo y de la cubierta vegetal sino que, con sensores “*full-waveform*”, se puede determinar la forma tridimensional de los árboles, es decir, caracterizar su especie a partir de los pulsos intermedios.

Además, los sistemas LiDAR tienen la capacidad de medir objetos muy pequeños altamente reflectantes, por ejemplo, las líneas de alta tensión que apenas son visibles en las imágenes ópticas, o cuya medición no puede ser automática.

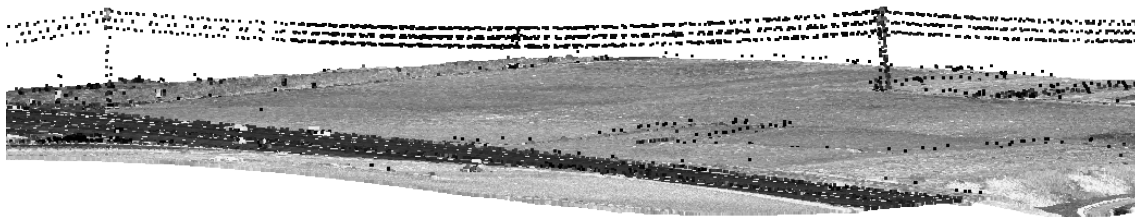


Figura 171: Perfil del tendido eléctrico y el terreno con objetos.

Asimismo, la independencia de fuentes de luz externas para registrar el objeto es otra de las ventajas del LiDAR respecto de la fotogrametría. Es una característica importante en fotogrametría aérea puesto que para la planificación de los vuelos fotogramétricos es necesario contar con la posición del Sol, la época del año, la orientación de las pasadas, la ausencia de nubes, etc. En un proyecto LiDAR esto no sería necesario puesto que emite su propia energía para registrar el objeto. En fotogrametría de objeto cercano, ocurren problemas similares como puede ser el registro bajo cubierta (interior de iglesias, cuevas, etc.) puesto que se necesita instalar cuidadosamente un sistema auxiliar de iluminación que permita tener todo el objeto iluminado pero sin reflexiones ni alta intensidad para no desvirtuar las imágenes registradas.

En la misma línea se podría hacer referencia a la necesidad de contraste en la superficie del objeto por parte de la fotogrametría, tanto para realizar la restitución por medio un operador como para realizar la correlación automática de imágenes. Un sensor LiDAR puede medir sobre superficies poco contrastadas u homogéneas como zonas de dunas sin vegetación, desiertos, superficies con hielo o nieve, campos cultivados homogéneos, objetos en sombra, etc. Sin embargo, existe la salvedad de las superficies muy pulidas o con baja reflectancia como pueden ser las superficies del agua, donde no se refleja adecuadamente el pulso láser y, por tanto, los sistemas LiDAR no resultan apropiados.

Lo mismo ocurre para el registro de zonas anegadas o inundadas, puesto que los sensores multispectrales apenas permiten el registro de zonas bajo el agua a pocos metros de profundidad y con aguas claras. Por el contrario, se pueden utilizar sensores LiDAR especiales para el registro de datos batimétricos (ALB) con profundidades de hasta tres veces la distancia Secchi que, dependiendo de la turbidez del agua, pueden representar hasta 80 m de profundidad.

Por otro lado, la precisión altimétrica de un modelo registrado mediante fotogrametría depende principalmente de la altura de vuelo y las características del sensor utilizado (aproximadamente, 0.02‰ de la altura de vuelo). En LiDAR, no se tiene tal dependencia de la altura de vuelo pero sí de la densidad de puntos, ya que ésta influye sobre la altura de vuelo, la velocidad del avión, y el FOV y frecuencia de muestreo del sensor. De hecho, se podría utilizar la siguiente fórmula (definida empíricamente) para calcular aproximadamente la precisión altimétrica de un vuelo LiDAR (Kraus, 2007):

$$\sigma_H = \pm \left( \frac{6}{\sqrt{n}} + 120 \cdot \tan \alpha \right)$$

Esta expresión viene expresada en centímetros, siendo  $n$  la densidad de puntos por metro cuadrado y  $\alpha$  la pendiente media del terreno. Se podrían obtener precisiones de unos 10 cm en cota y 30 cm en planimetría aproximadamente, por tanto, se suelen tener resultados en altimetría mejores que en planimetría, como se demostró en el apartado 3.3.6. Por tanto, en zonas con poca pendiente, la precisión es buena, pero cuando la altura cambia rápidamente, un error en planimetría se traduce inevitablemente en un error en cota.

Según el teorema de Shannon-Nyquist, existe una relación entre el espaciado de puntos registrados ( $\Delta$ ) y la longitud de onda del sensor ( $L_{\min}$ ).

$$L_{\min} \approx 3\Delta$$

Este espaciado de puntos se traducirá en GSD en el objeto, determinando la densidad de puntos. En el caso del LiDAR, será el factor determinante en la calidad del modelo registrado. Además, como ya se ha mostrado, los sensores LiDAR no registran puntos en particular por lo que los elementos definitorios de los objetos no son registrados, como sí ocurre en fotogrametría mediante el empleo de algoritmos VLL (*Vertical Line Locus*) que permiten obtener los puntos pertenecientes a un elemento estructural (Kraus, 2007). Por tanto, para poder representar una superficie plana se necesitarían al menos dos puntos registrados con el sensor láser y esto determinará el tamaño mínimo de objeto ( $B_{\min}$ ) que se puede registrar con LiDAR:

$$B_{\min} \approx 2\Delta$$

Para un determinado escáner, se puede variar el ángulo de apertura, la velocidad y altura de vuelo para conseguir diferentes densidades. Así, para un estudio detallado se pueden capturar unos 10 puntos/m<sup>2</sup>, mientras que para un trabajo más general pueden ser suficientes densidades inferiores a 1 punto/m<sup>2</sup>. Sin embargo, esta densidad será constante para todo el proyecto y no variable según la complejidad de la zona, pudiendo ser adecuado

disponer de diferentes densidades. Además, no se registrarán líneas estructurales, fundamentales para obtener un modelo digital de precisión.

Por el contrario, en fotogrametría es posible obtener un modelo digital de alta densidad y se pueden obtener las líneas estructurales mediante restitución fotogramétrica o, automáticamente, mediante técnicas de correlación de imágenes. De hecho, la resolución geométrica de las fotografías es muy superior a la del láser. Por ejemplo, si se desean extraer edificios, generalmente interesará medir los bordes y suponer superficies planas. A partir de un par de fotogramas, un operador puede medir estos puntos de interés con gran precisión; sin embargo, la baja resolución de una nube de puntos LIDAR no permite detectar con exactitud los límites del objeto. Se necesita una nube demasiado densa para poder tener suficiente precisión a la hora de definir bordes. Con sensores LiDAR se pueden conseguir hasta 20 puntos/m<sup>2</sup> (o hasta 40 puntos/m<sup>2</sup>, si se utiliza helicóptero volando a baja altura). Sin embargo, como se vio en el apartado 2.4.1.1, con fotogrametría multi-rayo, dependiendo de la altura de vuelo, se pueden conseguir hasta 200 puntos/m<sup>2</sup> con un GSD de 5 cm.

Por otro lado, la información registrada con LiDAR sólo es geométrica, en contraste con la fotogrametría donde es posible registrar información multiespectral en la parte del espectro electromagnético del visible y del infrarrojo lo cual podría permitir la identificación de objetos y su restitución. Realmente, los sensores LiDAR también recopilan información espectral por medio de la intensidad del pulso de retorno, pero la imagen generada es muy pobre siendo muy complejo delinear los límites de cualquier objeto.

Los archivos que contienen información LiDAR se componen de nubes de puntos de los que se almacena su posición 3D más otros parámetros como intensidad, eco o ángulo de registro. Estos archivos tienen estructura vectorial puesto que los puntos no están dispuestos en ninguna estructura de repetición regular. Esto provoca que no se puedan almacenar en formato raster como en el caso de las imágenes multiespectrales, por lo que ocupan mucho espacio en disco, lo que dificulta el tratamiento por parte del software. Por ello, no se pueden tratar grandes volúmenes de información en cada proceso para no saturar el ordenador ni incrementar el tiempo de cálculo. Además, aunque algunos algoritmos interpolan esta información para disponerla en forma de rejilla, las herramientas más habituales están basadas en complicados algoritmos de tratamiento de la información.

Habría que mencionar también la falta de procedimientos generales de calibración de sistemas LiDAR ya que cada fabricante emplea un método de calibración propio, complicando la elaboración de pliegos de condiciones técnicas. Se debería establecer una serie de procedimientos, quizás por parte de organismos oficiales como la ISPRS, para determinar la precisión de los sistemas, determinando el tipo de medidas a realizar, el tratamiento de la información y modelo de resultados.

En cuanto a los costes de adquisición de datos de proyectos aéreos, los vuelos LiDAR son más caros que los vuelos fotogramétricos convencionales debido, fundamentalmente, al recubrimiento del sensor y, en menor medida, al coste de los instrumentos. Como se vio en el apartado 3.3.2.1, el FOV del LiDAR no es muy amplio, por lo que es necesario realizar



más pasadas para cubrir la misma área. Esto tiene la ventaja sobre aperturas gran angulares de reducir el número de sombras de datos debido al abatimiento de los objetos. Además, la velocidad del avión debe ser más lenta que la utilizada para registro fotogramétrico, por lo que el rendimiento por horas de vuelo es menor.

Por ejemplo, para un vuelo LiDAR que genere una densidad de 10 puntos/m<sup>2</sup> con una apertura máxima (FOV) de 30° y con un sensor registrando a 400 kHz se necesitaría volar a 750 m de altura a una velocidad de 120 nudos. Teniendo en cuenta un solape para evitar huecos del 20%, se tendría un ancho efectivo en cada pasada de 480 m, aproximadamente. En cambio, un vuelo fotogramétrico con una resolución espacial de 15 cm de GSD y con un recubrimiento entre fotogramas del 60% para asegurar estereoscopía, necesitaría volar a una altura de 4000 m a una velocidad de 400 nudos, obteniendo un ancho de pasada efectiva de 1200 m aproximadamente, lo que significa casi tres veces más de recubrimiento que el LiDAR y a más del triple de velocidad. Esta configuración generaría 300 puntos/m<sup>2</sup> con información en cinco bandas (Pan, R, G, B, NIR).

En cuanto a la diferencia de precio de los sistemas no es cuantiosa puesto que los sistemas de fotogrametría digital actuales precisan de los mismos sensores de posicionamiento GNSS/INS y el precio de las cámaras digitales de gran formato es similar a los sensores LiDAR.

En el caso de proyectos de objeto cercano, las conclusiones varían. Las cámaras digitales de medio formato son más asequibles que los caros sistemas de barrido láser. Además, las aplicaciones fotogramétricas basadas en geometría convergente permiten obtener muy buenas precisiones a partir de fotografías realizadas desde diferentes puntos de vista y no son complicadas de manejar.

Por último, se podría hacer referencia a la precisión obtenida con ambas técnicas. Mientras que en fotogrametría la precisión planimétrica supera a la altimétrica, en LiDAR ocurre al contrario, siendo peor la precisión planimétrica que la altimétrica.

Aprovechando las ventajas de ambos sistemas que, además, permiten cubrir las limitaciones de ambos, se podría trabajar con un sistema combinado de ambos tipos de sensores. De esta forma, cada punto registrado geométricamente mediante láser podría tener información multispectral, además, desde varios puntos de vista (tantos como imágenes donde aparezca). Esta forma de integrar la información es cada día más habitual mejorando los resultados de registro. Por ejemplo, para el registro de biomasa podría ser la mejor solución obteniendo información multispectral imprescindible de la vegetación y la estructura tridimensional mediante registro LiDAR “*full-waveform*”. Además, se podría disponer de ortofotos prácticamente en tiempo real.

Esta combinación se puede conseguir de varias formas: utilizando información multispectral georreferenciada ya registrada (imágenes cónicas u ortofotos) para añadir datos a cada puntos LiDAR o utilizando sistemas LiDAR con cámaras de medio formato integradas, por lo que se registran ambos tipos de información en el mismo momento y con la misma orientación, ya que comparten sistemas de posicionamiento GNSS/INS.

### 3.6.5. Teledetección

La comparativa realizada entre LiDAR y fotogrametría podría extrapolarse a la utilización de sensores ópticos pasivos transportados en satélites. En este caso, el área cubierta por cada satélite y la rapidez en la adquisición de datos podrían ser sus principales ventajas. Sin embargo, el precio de las imágenes resulta, en determinados proyectos, poco competitivo. Además, la precisión altimétrica proporcionada por los productos ofrecidos por las diferentes agencias espaciales difícilmente llega a medio metro, lo que limita la escala de los proyectos donde es posible su utilización.

Por otro lado, también se podría hacer referencia a sensores activos como es el radar. Existen sensores aerotransportados como Intermap (Canadá), Orbisat (Brasil) y Fugro EarthData (Holanda), pero la gran mayoría son equipados en satélites, como se mostró en el apartado 2.5. El producto generado es similar al ofrecido en LiDAR puesto que se trata de un conjunto de datos con posiciones tridimensionales. Sin embargo, la resolución y precisiones obtenidas no son comparables a las ofrecidas por sensores LiDAR. La resolución es consecuencia de la longitud de onda utilizada por cada sistema y el tamaño de la antena. Mientras que en LiDAR se suelen utilizar longitudes de onda de 1064 nm, en radar se utilizan microondas, cuya longitud es próxima al centímetro. Para reducir el tamaño de la antena y mejorar la resolución, se suelen utilizar radares de apertura sintética (SAR) como se vio en el apartado 2.5.3.2.

Una de las principales ventajas del radar es la independencia de las condiciones meteorológicas, pudiendo operar incluso con la presencia de nubes. En LiDAR, las condiciones atmosféricas pueden afectar a la precisión de la medida.







































































En el caso de registro de vegetación, al igual que ocurre con sensores pasivos, el radar no puede atravesar el follaje pero se puede utilizar para registrar geométricamente la copa de los árboles pudiendo determinar el área de zona arbolada y su altura. Para ello, se puede utilizar la banda L y, más aún, la banda P. En cuanto a radar aerotransportado sólo Orbisat y EarthData tienen radar en la banda L, pero rara vez se utilizan para estas aplicaciones. Existen nuevos sistemas espaciales con la banda L que tienen potencial, junto con sensores ópticos o banda X o C y SAR polarimétrico, para proporcionar información muy útil sobre la vegetación en grandes áreas, aunque no la estructura 3D de los árboles que proporcionaría el registro “*full-waveform*” de LiDAR. Por tanto, el radar sólo sería más interesante en este ámbito, si se tuviera que registrar grandes áreas.

De hecho, aunque el LiDAR puede tener mayor densidad de información y más precisión que el radar, este segundo puede ser la mejor opción cuando se trata de medir un MDS de superficies mayores de 100000 km<sup>2</sup> con densidades aproximadas de 5 m y precisiones altimétricas de 1 m.

### 3.6.6. Resumen

A continuación, se expone en formato de tabla una caracterización de las diferentes técnicas de registro tridimensional, valorando su validez en inadecuado o mal resultado (punto rojo), poco adecuado o resultado mediocre (punto amarillo) y adecuado o resultado óptimo (punto verde).

Tabla 11: Caracterización de las técnicas de registro tridimensional.

	Topografía	GNSS	Fotogrametría aérea	CRP	Radar	LiDAR (TOF)	LiDAR (Triang.)
Escala regional							
Escala local							
Objetos > 2 m							
Objetos < 2 m							
Tiempo registro							
Tiempo edición							
Complejidad hardware							
Complejidad software							
Precio hardware							
Precio software							

Según las ventajas e inconvenientes de cada técnica destacadas en este capítulo, se puede concluir que ninguna técnica es completamente infalible para un proyecto completo y en todo proyecto se plantean dificultades y casos en los que convendría combinar algunas de las técnicas vistas. Por ejemplo, en un proyecto de documentación geométrica de un asentamiento arqueológico con edificaciones en pie se podría utilizar fotogrametría para zonas donde sea posible la estereoscopía o donde la correlación sea aceptable (fachadas por ejemplo), LiDAR (TOF) para zonas de geometría complicada u oclusiones, GNSS para el establecimiento de una red de estaciones que actúe de marco de referencia y una estación total para medir puntos de apoyo para los pares estereoscópicos o para transferir coordenadas a zonas bajo techo o interiores de edificios. Los detalles ornamentales podrían ser registrados utilizando LiDAR basado en triangulación.

### 3.7. Tendencia futura

Aunque es difícil predecir el futuro de una tecnología por la rapidez con la que avanza todo, se podrían predecir ciertos avances a medio o corto plazo (Toth, 2010).

Con la implementación de múltiples pulsos se han alcanzado velocidades de medio millón de puntos por segundo. Los escáneres láser terrestres Leica ScanStation P20 y Velodyne HL-64E han llegado al millón de puntos utilizando la misma tecnología (TOF) que los sensores aéreos, por lo que no sería descartable que próximamente salieran al mercado sensores aéreos con velocidades similares.

Actualmente, la detección del pulso y el cálculo de la intensidad se realizan en tiempo real. Sería deseable que, para aprovechar las mejoras que se consiguen en el post-proceso en la georreferenciación, estas tareas se realizaran también en post-proceso.

Por otro lado, actualmente también supone un problema registrar en “*full-waveform*” por la cantidad de datos que genera. Sin embargo, también se podría solventar con el uso de discos duros en estado sólido (como hace la cámara Vexcel UltraCam) y con la utilización de formatos de compresión (por ejemplo, LASzip). Además, esta información “*full-waveform*” debería servir para algo más que para la identificación de especies forestales, por ejemplo, para la reconstrucción de zonas urbanas o para la clasificación.

Ya existen constructores que ofrecen sistemas con cámaras ópticas de medio formato incorporadas de manera robusta sin necesidad de calibración en post-proceso. Está demostrado que la utilización de sensores pasivos mejora la interpretación y cálculo de los datos LiDAR. Por ello, una posibilidad de mejora existe cuando se integren de manera robusta cámaras ópticas de gran formato. Cuando esto ocurra se tendrán datos muy precisos debido a la alta definición de las cámaras de gran formato actuales y se podrá plantear la extracción de entidades geográficas, por lo que se podría obtener de manera automática planimetría y altimetría con un solo vuelo.



# Modelo de datos y procesado de la información con sistemas láser

## 4.1. Estructuras y formato de la información

Como se ha comentado anteriormente, los datos generados por un sensor LiDAR son una nube de puntos definida por sus coordenadas de posicionamiento 3D. Además de éstas, el sensor registra la intensidad con la que se reflejó el pulso láser. Por tanto, para almacenar esta información se precisaría de un formato que al menos contemplara estos cuatro parámetros. Algunos sensores terrestres tienen formatos propios y permiten exportar alguna información en diversos formatos ASCII, perdiendo otra información de interés. Esto también lo realizan determinadas aplicaciones comerciales. Sin embargo, no parece lo más adecuado, puesto que el volumen de información provocaría archivos exagerados y su tratamiento sería muy lento.

Los formatos ASCII más utilizados incluyen las coordenadas XYZ y opcionalmente la intensidad y/o el color descompuesto en RGB, todo ello separado por espacios, utilizando para cada registro una línea del archivo. Por ejemplo, Leica tiene dos formatos de exportación en su software *Cyclone* (más información en el apartado C.3.3): formato PTX que incluye, en forma de matriz ordenada según se registró, las coordenadas de los puntos, la intensidad con un rango de -2500 hasta +2500 y el color descompuesto en RGB; formato PTS, que incluye los mismos campos que el formato anterior pero de forma no ordenada.

Para poder almacenar todos los datos útiles de una medición LiDAR, la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) desarrolló en 2003 un formato de archivos que pudiera ser utilizado por los fabricantes de sensores y las compañías de software como formato de intercambio de información LiDAR. Con el paso del tiempo, ha tenido varias revisiones para poder añadir toda la información adicional que los diferentes sensores son capaces de almacenar y, actualmente, se ha convertido en el estándar para LiDAR. La última versión vio la luz a finales de 2011 y es la 1.4. De manera general, el



formato se ha convertido en un estándar más para el almacenamiento de coordenadas tridimensionales de puntos (ASPRS, 2010).

El formato es binario y público, de tal manera que es fácil acceder a su definición interna desde la propia página web de la ASPRS. Su estructura interna posee una cabecera con metadatos que incluye la empresa, sensor, fecha, dimensiones y el tamaño de la estructura que albergará posteriormente cada punto. Posteriormente, se almacenan los puntos agrupados por pasadas o puntos de vista. La cantidad de información por cada punto depende de la versión de cada archivo. En la última versión, cada punto incluye las coordenadas 3D, la intensidad, el número de retorno del pulso, el número total de retornos para ese pulso, la dirección de escaneo, la clasificación y el ángulo del rayo.

Recientemente, se ha presentado un nuevo formato para el almacenamiento de información LiDAR y basado en el formato LAS. Este formato, denominado LASzip o LAZ, representa una compresión sin pérdida de los datos que permite reducir los archivos hasta un 10 ó 20 por ciento del tamaño original. Esta compresión específica de este tipo de datos, mejora en tiempo y capacidad a otros compresores genéricos como GZIP o RAR. Además, no es necesario descomprimirlo previamente, puesto que las aplicaciones que lo soportan permiten abrirlo como un formato estándar de archivos LiDAR (Isenburg, 2013).

Otro formato de utilidad es el STL (*Standard Tessellation Language*), creado por la empresa 3D Systems y utilizado inicialmente por las aplicaciones CAD para estéreo-litografía. Actualmente, es un formato muy extendido para la importación/exportación de modelos digitales basados en triangulaciones. Este formato describe la geometría de la superficie de un objeto tridimensional sin información de textura o color. De hecho, en su estructura sólo contempla, para cada triángulo, las coordenadas de sus tres vértices y el vector característico de la superficie. Tiene dos versiones, ASCII y binario, aunque la segunda es mayoritariamente utilizada por ocupar menos espacio y ser de más rápida lectura.

## 4.2. Láser aerotransportado

El resultado de una medición LiDAR es un conjunto de puntos con coordenadas en el mismo sistema de referencia que el utilizado en el GNSS que disponía el avión. Por tanto, una de las primeras actuaciones que hay que realizar (aunque también se puede abordar en un paso posterior) sería la transformación de coordenadas para obtener estas en el sistema de referencia final del proyecto.

La nube de puntos está sin tratar y, como todo automatismo, precisa de la intervención del usuario para su depuración. Este proceso tendrá varias misiones: eliminar errores producidos en el proceso de medición, eliminar puntos procedentes de objetos no deseados (figura 172) y seleccionar los puntos en función de la utilidad que se quiera dar a la nube final (figura 173). Para este cometido, se han desarrollado un gran número de algoritmos, aunque la mayoría de los esfuerzos se centran en separar los puntos que pertenecen al terreno de los que están en objetos sobre él. Este análisis debería ser automático pero suele ser habitual la intervención del usuario para obtener unos resultados óptimos. Además, otros algoritmos tienen objetivos más precisos como determinar la superficie construida, modelar los edificios de una zona urbana, determinar la altura de los árboles o calcular el volumen de madera de un bosque.

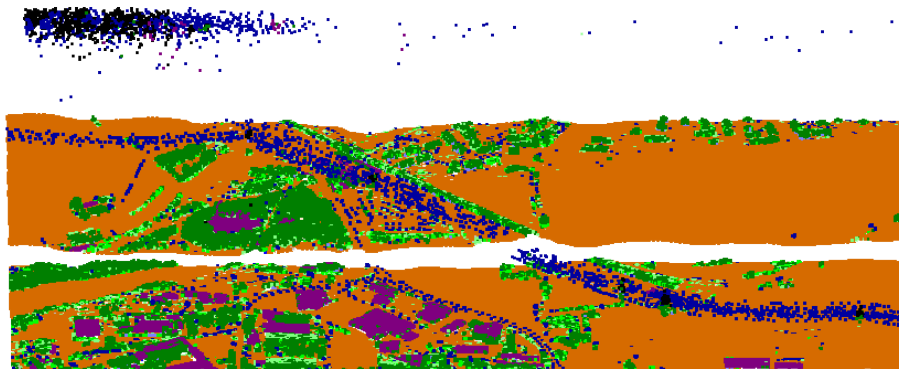


Figura 172: Archivo con puntos en la parte superior erróneamente medidos, posiblemente debido a la presencia de un río (zona central sin puntos).

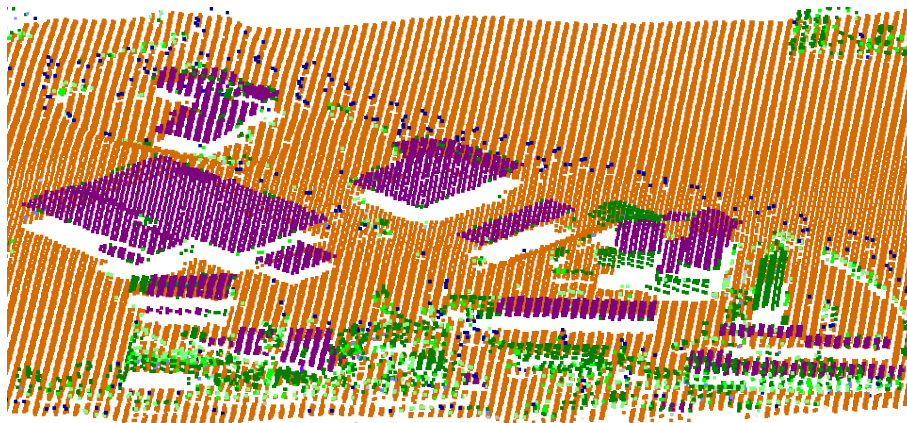


Figura 173: Detalle de la figura anterior donde se han clasificado puntos pertenecientes al terreno desnudo (naranja), edificaciones (morado), vegetación (verde) y líneas eléctricas (azul).

A continuación, se señalan las diferentes fases que involucra el procesamiento de datos ALS, desde la recogida de información por parte de los sensores que conforman el sistema hasta la obtención del producto final que, en unos casos, será un modelo digital y, en otros, será un producto derivado. De una manera muy esquemática y resumida, los diferentes procesos se esquematizan en la figura 174.

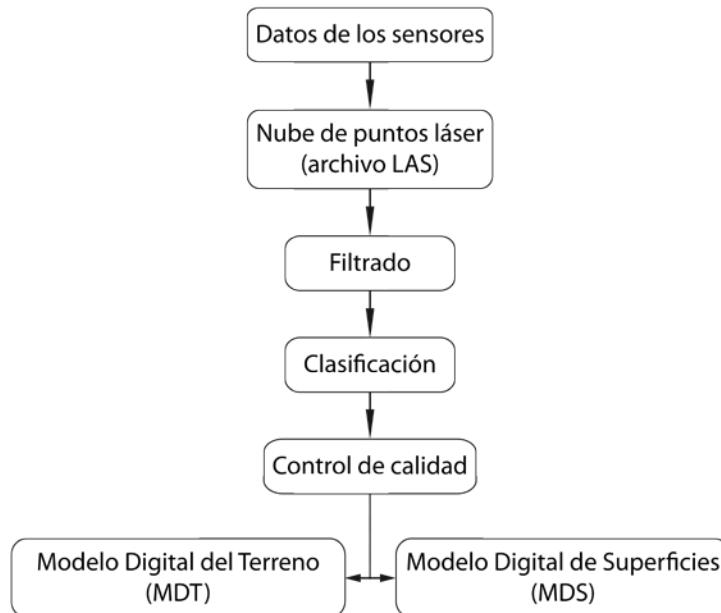


Figura 174: Gráfico resumen del procesamiento de datos ALS.

#### 4.2.1. Datos de los sensores

El primer paso para la medición de una zona mediante ALS es la planificación del vuelo. Esta planificación dependerá de un pliego de prescripciones técnicas que dará idea de la precisión con la que tienen que medirse los puntos. En función del sensor que se disponga se deberán definir parámetros tan importantes como altura de vuelo o número de pasadas que quedarán definidas por el ancho de pasada que puede registrar el sensor. El proceso de definición del número pasadas deberá ser suficiente para cubrir toda la zona, sin huecos, por lo que siempre se producen solapes entre diferentes pasadas. A su vez, este solape tiene la misión de poder homogeneizar los datos pertenecientes a diferentes pasadas, pudiendo ser adecuado un solape lateral mínimo del 30% (Baltsavias, 1999). Además, con el fin de disminuir los errores asociados al incremento del ángulo de apertura FOV, se recomienda realizar pasadas transversales, que podrán incluso detectar errores de cabeceo del avión.

Por otro lado, la precisión mínima requerida definirá el tamaño de la huella láser en el terreno y este, a su vez, definirá la altura de vuelo. El cálculo de estos parámetros puede realizarse con la formulación explicada en el Anexo A.

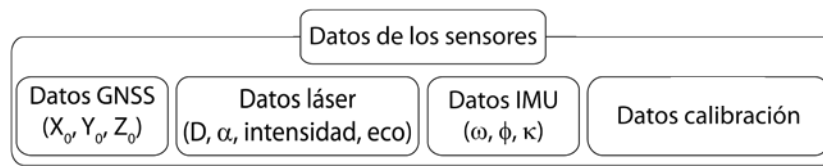


Figura 175: Gráfico con la procedencia de los datos de los diferentes sensores ALS.

Una vez realizado el vuelo y con los datos obtenidos de los tres sensores involucrados, se deben realizar un conjunto de procesos para obtener los datos “en bruto”. En una primera fase, se obtienen coordenadas locales referidas a cada pasada. Con las posiciones de la trayectoria del sistema GNSS/INS, conjuntamente con la red GNSS de tierra y utilizando la ecuación general del láser se obtienen las coordenadas de cada retorno láser. A continuación, se homogenizan las pasadas, con el fin de corregir de errores sistemáticos debidos a los sistemas GNSS/INS o al “ruido” en el sensor láser (Vosselman & Maas, 2001).

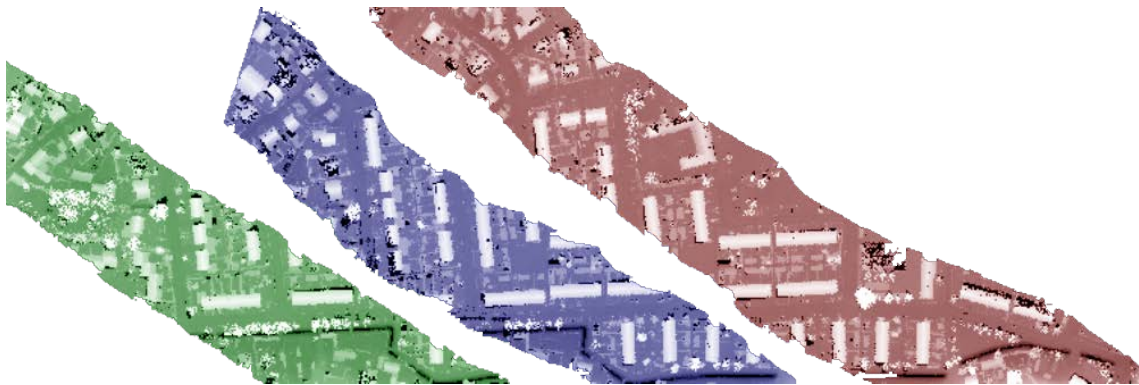


Figura 176: Ejemplo de tres pasadas antes de ajustar.

De esta forma, se genera un conjunto de datos único mediante la corrección de los errores sistemáticos entre las pasadas.

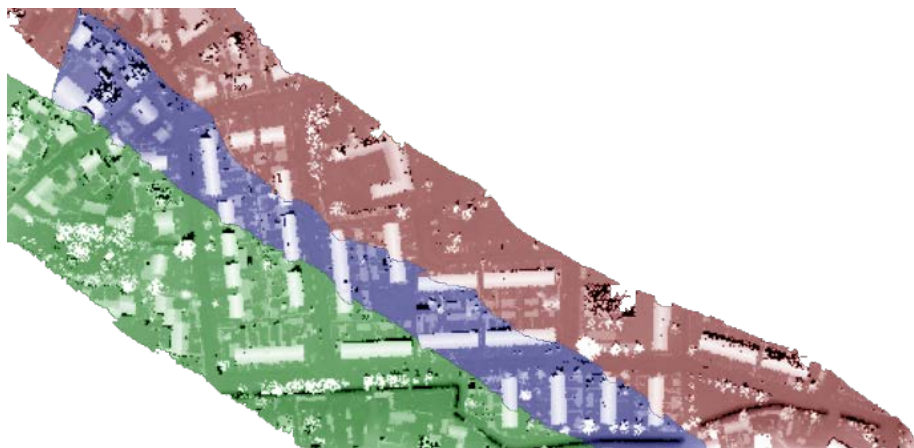


Figura 177: Ejemplo con las tres pasadas ajustadas.

El proceso de ajuste entre pasadas tiene cierta analogía con el ajuste de modelos independientes con parámetros de auto-calibración que se realiza en fotogrametría aérea. Es

decir, se pretenden modelar los desplazamientos, giros y otros errores sistemáticos utilizando para ello puntos de ajuste comunes entre pasadas y puntos de control en campo. El cálculo se realiza mediante MM.CC. de tal manera que los puntos de ajuste correspondientes se transformen en un mismo punto terreno, minimizando los residuos en los puntos de control. Por tanto, se tiene, por un lado, el ajuste entre pasadas para generar un bloque homogéneo de información y, por otro lado, el ajuste del bloque a unos puntos de control de coordenadas conocidas en el sistema de referencia local.

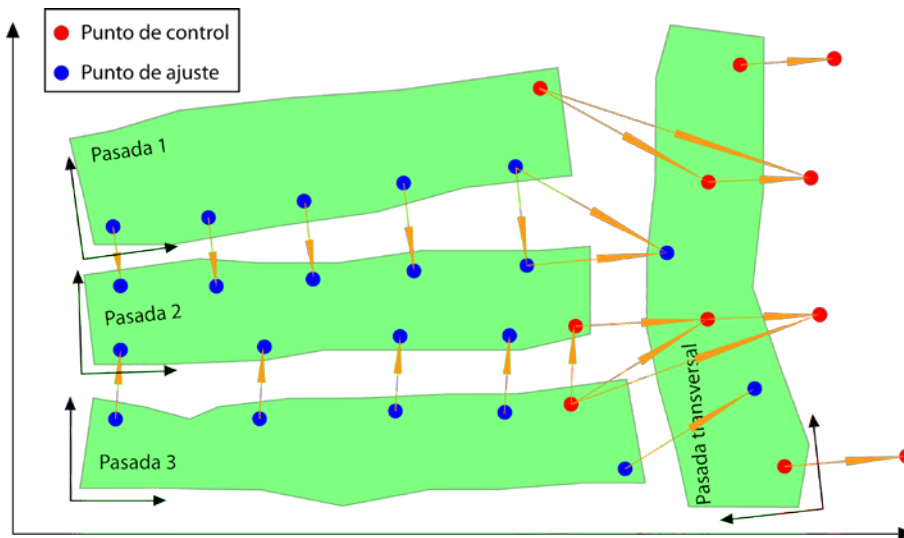


Figura 178: Pasadas independientes con puntos de ajuste.

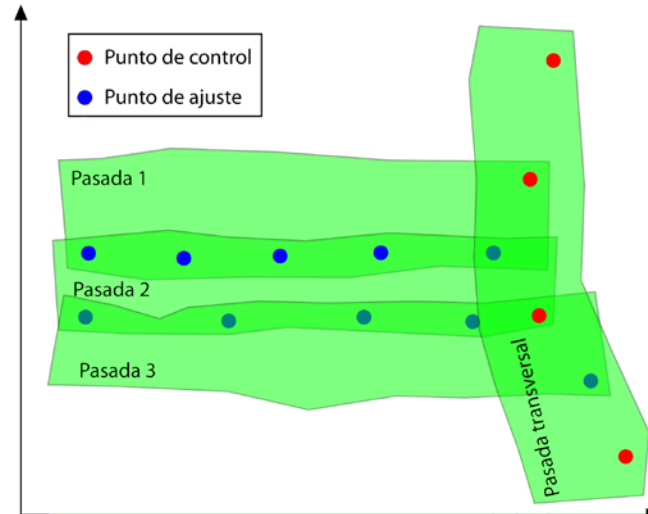


Figura 179: Pasadas transformadas al sistema de referencia.

Como se trató en el apartado 3.3.6 dedicado a los errores de la medida ALS, la precisión planimétrica del sistema es inferior que la altimétrica. Por tanto, se podría realizar el ajuste de las pasadas en planimetría, sólo en altimetría o tridimensionalmente. Sin embargo, el principal hándicap del ajuste entre pasadas LiDAR, en general, es la identificación de puntos homólogos y puntos de control dados en el terreno. El sistema de recogida de la información es “no selectivo” por lo que, con bastante probabilidad, no se tendrán medidas de un determinado punto en el espacio.



Resulta un proceso complejo que, de no realizarse o realizarse inadecuadamente, podrá inducir errores en el modelado de la superficie en las zonas de solape. Por ejemplo, en uno de los activos experimentales realizados se detectaron errores de solape entre pasadas produciendo los errores mostrados en la siguiente figura.

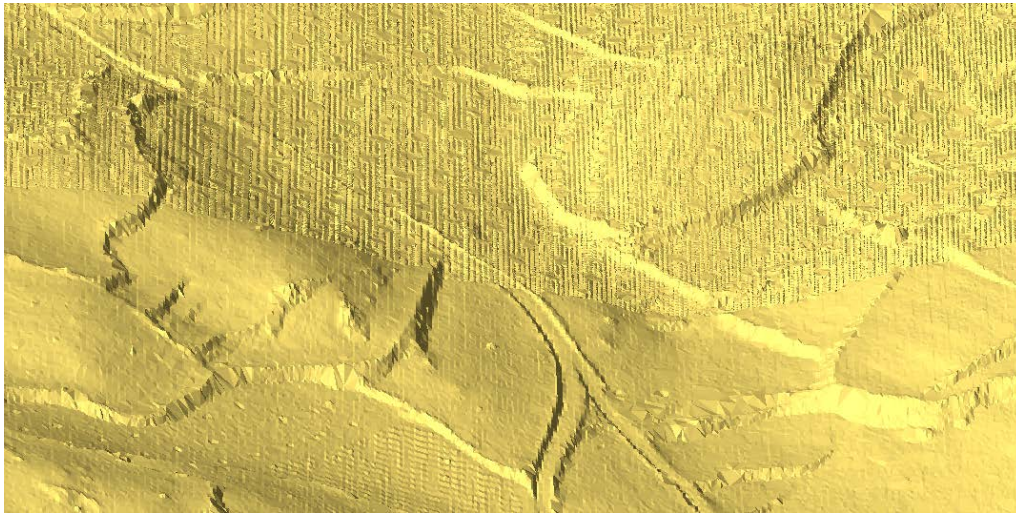


Figura 180: Errores producidos en el modelado de la zona de solape entre dos pasadas.

En la figura 180, se puede apreciar el modelo digital generado por una nube de puntos ALS. La mitad sur corresponde con el modelado de la superficie de puntos pertenecientes a una única pasada. La mitad norte corresponde con el modelado de la superficie a partir de los puntos pertenecientes a dos pasadas, es decir, es la zona de solape. Se puede apreciar visualmente que se generan triángulos como pequeños montículos debido a la diferencia altimétrica entre ambas pasadas. El error es claramente altimétrico porque la superficie tiene pendiente prácticamente continua por lo que un error planimétrico no se manifestaría en el modelo general. Esta detección ha sido visual, pero tiene sus consecuencias en los modelos de representación del relieve derivados, como por ejemplo, el curvado de la zona.

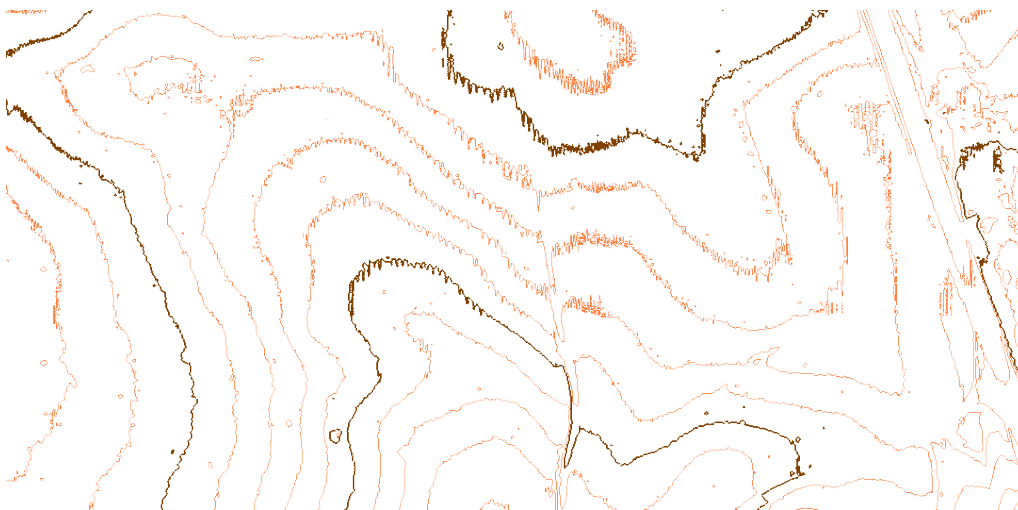


Figura 181: Curvas de nivel generadas en una zona de solape entre pasadas ALS.



Al igual que antes, la mitad sur corresponde a datos de una sola pasada y las curvas de nivel presentan una buena morfología acorde con el relieve de la zona. Sin embargo, la mitad norte presenta curvas de nivel con muchos quiebros, en el argot conocidas como “rizadas”, como si correspondieran a una zona de malpaís o con micro-relieve irregular. Este resultado es inaceptable. En el apartado 7.1.1 se dan detalles del cálculo del error y de las soluciones aportadas.

Si se desea realizar un ajuste altimétrico, se deben establecer puntos de control en zonas donde sea posible medir la inclinación a partir de los puntos LiDAR medidos. Por ejemplo, podrían ser válidos los puntos medidos sobre la cubierta de un edificio. Como se vio en el apartado 3.3.6, cada error produce una distorsión distinta. Por ejemplo, el error en  $Z$  depende de los errores del GNSS ( $Z_0$ ), el ángulo de alabeo ( $\omega$ ) y el de la medida láser. Por tanto, el ajuste mínimo cuadrático de un conjunto de puntos nutrido y bien distribuido podría dar los parámetros de rectificación de  $Z_0$ ,  $\omega$  y de la medida láser.

Sin embargo, para realizar un ajuste planimétrico se precisan seleccionar zonas con una posición XY determinada. Un ajuste realizado sólo con puntos dados en altimetría no sería suficiente salvo raras excepciones. Por ejemplo, la tabla 12 muestra los errores que se producirían en planimetría al intentar ajustar la nube de puntos sobre un objeto de altitud conocida. La figura 185, muestra un posible ajuste sobre una cubierta inclinada donde se podría ajustar bien la nube en la dirección perpendicular a la limateza del tejado.

Tabla 12: Errores de ajuste entre un objeto y la nube de puntos LiDAR por similitud de cotas de puntos vecinos en una cubierta plana.

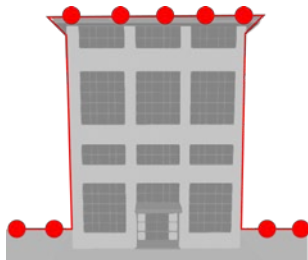


Figura 182: Posición correcta de la edificación.

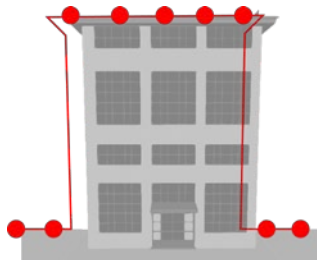


Figura 183: Edificación ajustada a la izquierda.

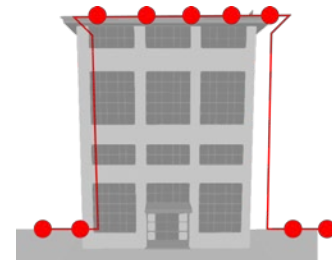


Figura 184: Edificación ajusta a la derecha.



Figura 185: Puntos sobre una cubierta inclinada de un edificio.

Si se desea realizar un ajuste planimétrico o tridimensional de la nube de puntos LiDAR sería necesario identificar puntos o, mejor aún, elementos lineales sobre la nube. Sin embargo, la identificación de elementos en LiDAR es complicado al tratarse de un sistema de medición no selectivo y discreto por lo que sólo quedarán registrados algunos puntos y no necesariamente los más interesantes. Por ejemplo, el registro topográfico es discreto pero

selectivo por lo que el usuario puede elegir los puntos más significativos del territorio u objeto. Por el contrario, el registro fotográfico es no selectivo pero continuo por lo que se queda registrada toda la imagen del objeto siendo posible digitalizar sus límites.

Las siguientes figuras muestran un archivo LiDAR visualizado mediante la intensidad de los puntos y algunas líneas estructurales (bordes de camino y cabezas de talud) registradas mediante restitución fotogramétrica. En la figura 186, se puede ver cómo corresponde la posición planimétrica de ambos tipos de datos. Sin embargo, una vista a escala mayor, como la mostrada por la figura 187, pone de relieve lo difícil que sería registrar estas líneas estructurales únicamente con información LiDAR. Apenas se identifica qué puntos son camino y cuáles no lo son. Por supuesto, el límite exacto del camino queda totalmente indefinido. Si además, no existiera diferencia radiométrica, como ocurre con las cabezas de talud, la tarea de digitalización es imposible.

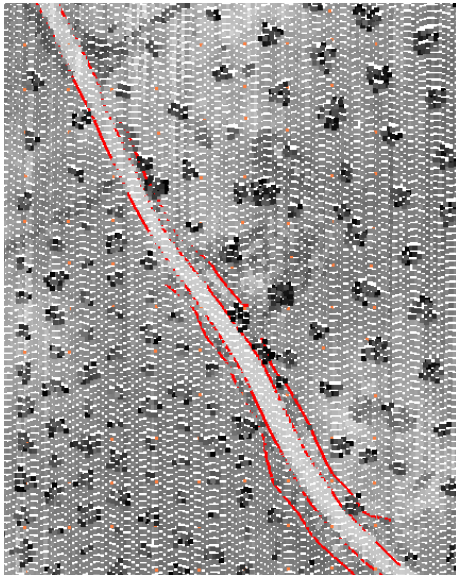


Figura 186: Archivo procedente de ALS más líneas estructurales registradas mediante restitución fotogramétrica.

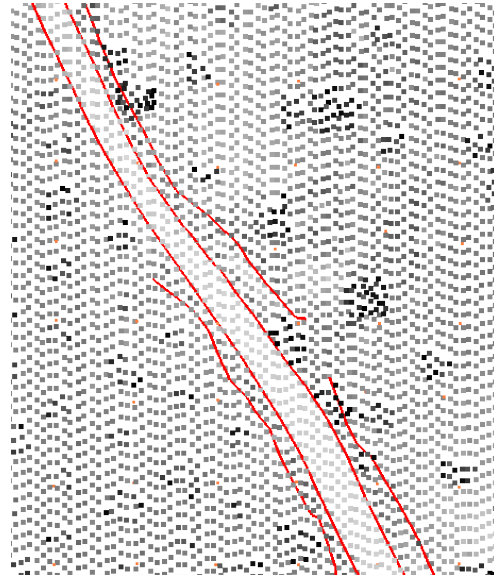


Figura 187: Vista de detalle de la figura anterior. A simple vista, es difícil distinguir qué puntos están en el interior del camino.

Las siguientes figuras muestran las diferencias entre el registro LiDAR y el registro fotográfico. A pesar de las bondades del registro LiDAR, es complicado identificar perfectamente las líneas definitorias de los elementos arquitectónicos únicamente basándose en la nube de puntos, aun cuando estos puntos tienen información radiométrica, como es el caso. Si no se dispusiera de la información radiométrica, se tendrían que digitalizar líneas en los cambios de intensidad, los cuales no son tan eficientes por lo que la dificultad aumenta. En cualquier caso, las líneas introducidas deberían ser numerosas y colocadas con homogeneidad en la zona y orientación variada.

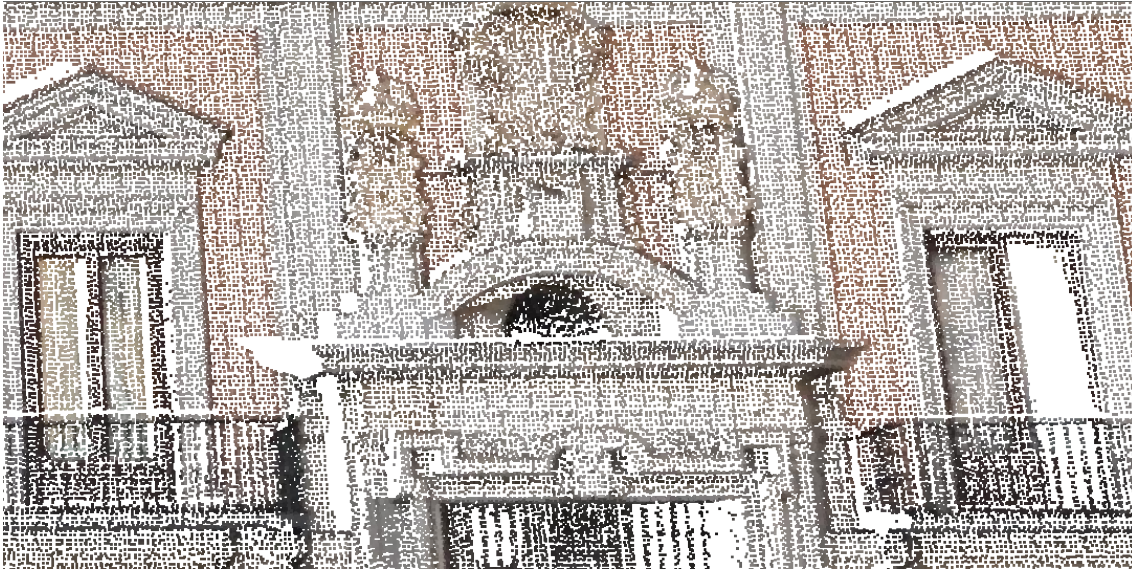


Figura 188: Fachada arquitectónica registrada mediante LiDAR.



Figura 189: Fachada arquitectónica registrada mediante cámara fotográfica.

Por tanto, el ajuste entre pasadas y entre el conjunto de puntos y los puntos de control en el terreno puede ser factible en altimetría pues se pueden elegir zonas de inclinación o altitud conocida para realizarlo, sin cometer mucho error, aunque dichas zonas no son sencillas de encontrar en entornos naturales o rústicos. Sin embargo, el ajuste planimétrico y/o tridimensional, tiene el hándicap de la identificación de entidades (a ser posible lineales) en la nube de puntos LiDAR, por lo que los datos calculados vendrán afectados de la precisión o densidad de la nube de puntos. En el capítulo 7.1.1, se muestran los errores calculados en uno de los activos experimentales realizados.

#### 4.2.2. Nube de puntos láser

Una vez combinados y calculados los datos de los diferentes sensores y después de realizar el ajuste entre las diferentes pasadas y con los puntos de control, se dispone de una nutrida nube de puntos definidos por sus coordenadas tridimensionales además de otras características registradas por el sensor láser.

Estas coordenadas estarán referidas al mismo sistema de referencia utilizado por la antena de posicionamiento global GNSS (WGS-84). Sin embargo, el proyecto puede precisar las coordenadas tridimensionales en otro sistema de referencia y con otras características diferentes. En el Anexo D, se detallan las características de los diferentes sistemas de referencia.

La figura 190 muestra las posibles transformaciones que pueden llevarse a cabo sobre la nube de puntos hasta obtener las coordenadas finales deseadas.

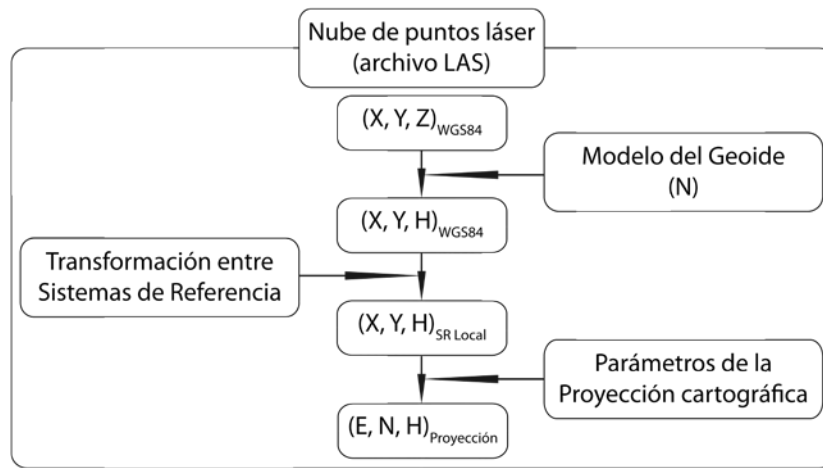


Figura 190: Transformaciones a realizar con la nube de puntos ALS.

Las coordenadas cartesianas de los puntos registradas por el escáner láser son calculadas a partir de las funciones de orientación que proporcionan tanto el GNSS como el INS, a partir del IMU. El sistema GNSS proporciona las coordenadas absolutas de la posición del sensor para el instante  $((X_0)_t, (Y_0)_t, (Z_0)_t)$ . El sistema inercial IMU proporciona los ángulos de inclinación del sensor para el mismo instante  $(\omega_t, \phi_t, \kappa_t)$  y el sensor láser proporciona las medidas a un punto definido por las coordenadas polares distancia y ángulo  $(d_t, \alpha_t)$ . La fórmula que relaciona todos estos parámetros es:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (X_0)_t \\ (Y_0)_t \\ (Z_0)_t \end{pmatrix} + R_{\omega_t, \phi_t, \kappa_t} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ d_t \cdot \sin \alpha_t \\ d_t \cdot \cos \alpha_t \end{pmatrix}$$

La coordenada altimétrica utilizada por los sistemas de posición GNSS está referida a una superficie matemática tomada como referencia u origen de altitudes. Esta superficie debería ajustarse en lo posible a la forma de la Tierra y su forma ideal viene dada por la



definición de un elipsoide. El elipsoide utilizado por el sistema WGS-84 tiene el mismo nombre que el sistema. Sus características están definidas en el Anexo D. Por tanto, esta coordenada altimétrica es comúnmente denominada altitud elipsoidal. Esta altitud no suele ser utilizada en los proyectos cartográficos ya que se precisa de una superficie física (geoide) y no matemática para referir las alturas. En caso contrario, la transferencia de altura de un punto a otro dependería del proceso realizado para ello. Las alturas referidas al geoide se denominan alturas ortométricas.

Para transformar las altitudes elipsoidales a altitudes ortométricas es preciso conocer la diferencia entre el elipsoide y el geoide en cada punto. Esta diferencia es conocida como ondulación del geoide. Para obtenerla, se suele utilizar un modelo del geoide facilitado por las diferentes administraciones cartográficas locales. En el caso de España, el IGN facilita el modelo EGM-2008, modelo geoidal mundial publicado en 2008 (NGA, 2013). Este modelo ha sido ajustado por el IGN según la REDNAP y demuestran que se puede obtener la ondulación del geoide en un punto con una precisión de 4 cm (Instituto Geográfico Nacional, 2009).

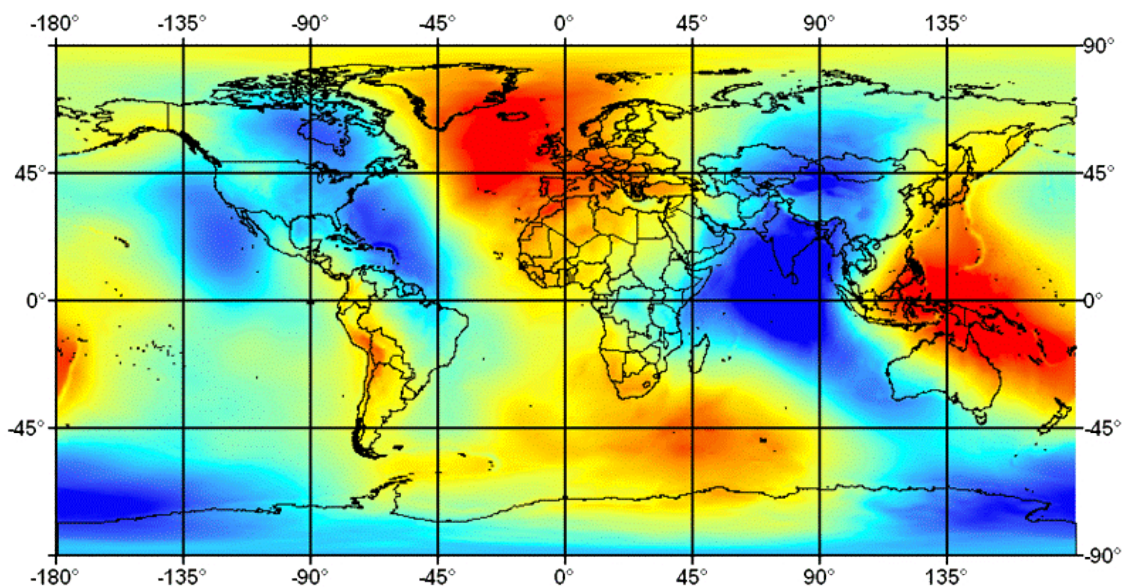


Figura 191: Modelo del geoide mundial EGM2008 de la NGA.

A continuación, se debería considerar el sistema de referencia oficial en la zona, puesto que no tiene por qué coincidir con el sistema WGS-84 adoptado por el GNSS. Para poder realizar la transformación entre dos sistemas de referencia es necesario tener puntos comunes en ambos sistemas que abarquen la zona de trabajo, evitando realizar extrapolaciones. Las diferentes transformaciones matemáticas que se pueden utilizar en función del tamaño y forma del área de trabajo están contenidas en el Anexo D.

Particularizando para España, actualmente conviven dos sistemas de referencia oficiales hasta 2015 (ED-50 y ETRS-89), aunque desde hace algunos años no se hace cartografía nueva en el sistema ED-50. Lo normal sería transformar al sistema ETRS-89. Sin embargo, esta transformación no implica ningún cálculo matemático porque, a pesar de que utilizan diferentes elipsoides (GRS-80 para ETRS-89), sus diferencias no son

apreciables a efectos geodésicos por lo que las coordenadas de los puntos en ambos sistemas son idénticas. Si se requiriera calcular el trabajo en el sistema ED-50, se deberían calcular los parámetros de transformación de la zona. Como es necesario tener puntos de coordenadas conocidas en ambos sistemas se podrían utilizar los vértices de la red REGENTE del IGN puesto que cumplen esta característica. Su densidad, de al menos un punto por cada hoja del MTN 1:50.000, permitiría cubrir casi cualquier tipología de trabajo.

Por último, se deberían calcular las coordenadas de los puntos sobre una proyección cartográfica. Particularizando nuevamente para España, se deberían calcular las coordenadas en la proyección UTM. Esta proyección utiliza husos o zonas para limitar las deformaciones que puede tener la cartografía, siendo cinco para toda España (husos 27 y 28 para las Islas Canarias y husos 29, 30 y 31 para la península y Baleares). Según la zona, se deberá elegir el huso. Sin embargo, podría ocurrir que la zona fuera atravesada por un cambio de huso. En este caso, lo más natural y para conservar la continuidad de la cartografía del trabajo es que se transforme todo a uno de los husos, utilizando el concepto de huso extendido.

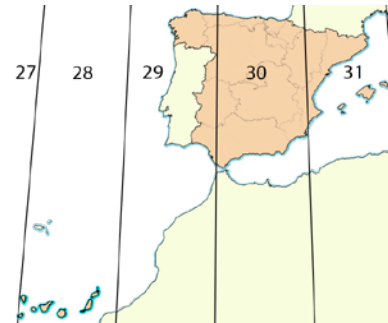


Figura 192: Husos UTM para España.

### 4.2.3. Filtrado

En prácticamente todas las aplicaciones LiDAR, la clasificación del suelo es necesaria para determinar qué pulsos LiDAR proceden del suelo y cuáles de otro tipo de objetos o entidades, por ejemplo, edificios, puentes o vegetación (árboles y arbustos). En algunas zonas, esta distinción es especialmente complicada. Sin embargo, esta tarea es imprescindible si se desea extraer un MDT preciso de la zona.

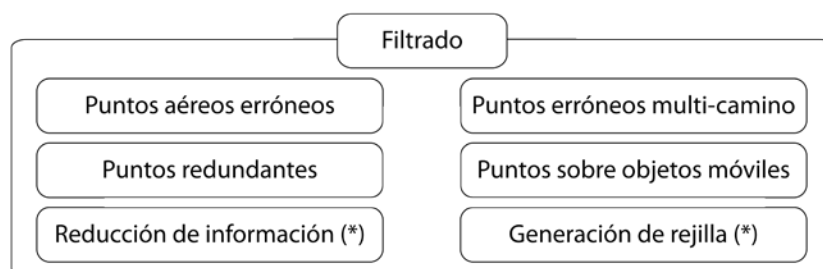


Figura 193: Gráfico con las tareas a realizar en el filtrado de datos ALS.

Para abordar la clasificación de objetos, son primordiales unos procedimientos previos que prepararán la información, eliminando errores o redundancias existentes que pueden dificultar tareas posteriores.



Uno de los procedimientos habituales es el filtrado de errores groseros. No son muchos los errores que aparecen y suele ser debidos al rebote del pulso sobre objetos entre el sensor y el suelo como aves o aviones (figura 194).

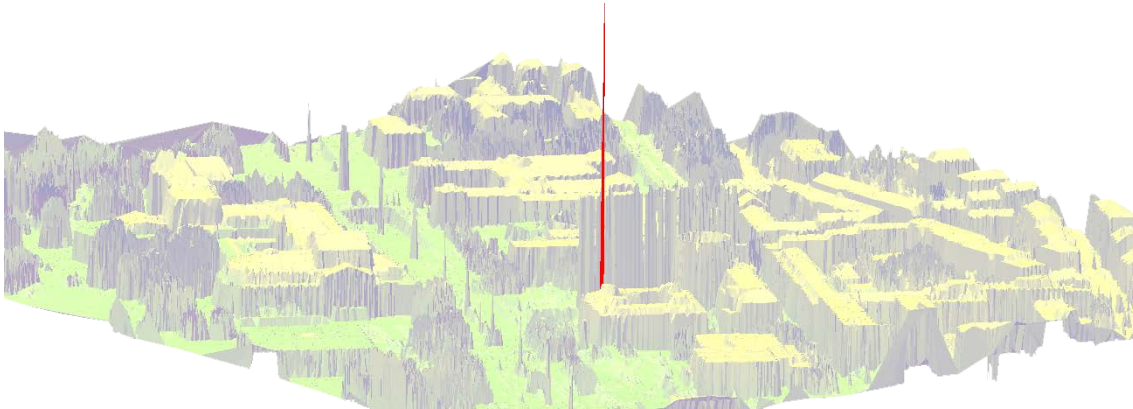


Figura 194: Modelo con triangulación generada con un punto aéreo. De color rojo, los triángulos generados con dicho punto.

También pueden ser debidos a la incorrecta reflexión del rayo en superficies muy pulidas, espejos o superficies de agua (efecto multi-camino, al igual que ocurre con la señal GNSS), generando puntos hundidos por un mal cálculo de la distancia recorrida por el rayo (figura 195). La detección de los puntos hundidos tiene una especial importancia porque muchos algoritmos parten de la determinación de que los puntos pertenecientes al suelo representan un mínimo local y, a partir del valor del desnivel o de la diferencia de cota con sus puntos de alrededor, se van tomando decisiones en la clasificación de puntos. Así, si un punto hundido varios metros es tomado como punto de suelo, sus puntos vecinos pueden ser considerados como puntos de objetos (árboles o edificaciones) por estar varios metros por encima de este punto de suelo.

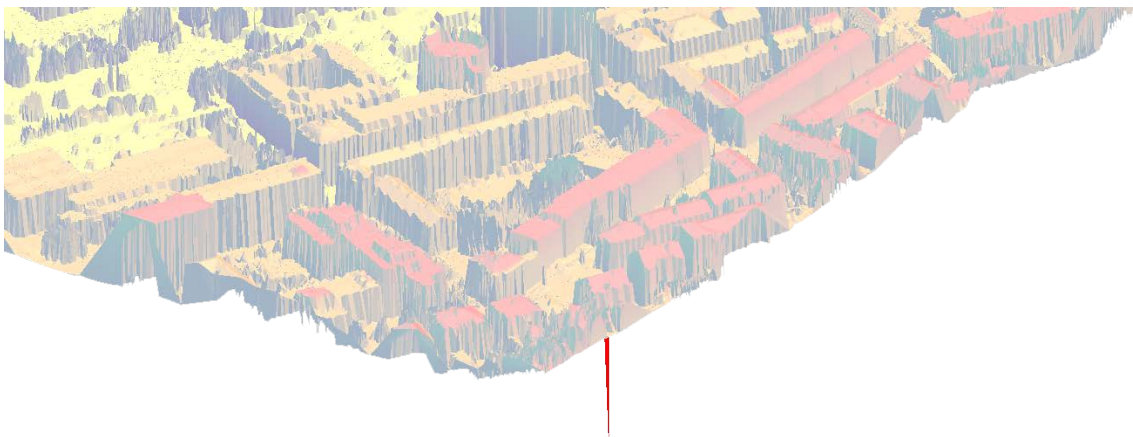


Figura 195: Modelo con triangulación generada con un punto hundido. De color rojo, los triángulos generados con dicho punto.

Tanto unos puntos como otros, tienen un valor de cota exageradamente diferente (más alto o más bajo) respecto a su entorno por lo que no ofrece dificultad su localización y eliminación o clasificación. Se pueden utilizar herramientas que buscan en el entorno, apoyándose en un algoritmo de vecindad (triangulación de Delaunay) o incluso

visualmente revisado por el usuario. La suma de ambos conjuntos de errores no alcanza siquiera el 0.1% del total de la nube.

A continuación y aunque no es imprescindible, se podrá considerar realizar una interpolación y reorganización de datos, reduciendo la cantidad de información disponible (Hur, et al., 2002). De hecho, algunos algoritmos necesitan la información dispuesta en formato raster, sobre todo si se tienen varias pasadas o si la densidad es muy variable. Esta reorganización también tiene como misión el aumento en la velocidad de búsqueda de puntos, a veces solucionada con algoritmos de vecindad. Los métodos de interpolación utilizados pueden ser numerosos: media ponderada, el más bajo, el más alto, el más cercano, etc.

#### 4.2.4. Clasificación



Figura 196: Gráfico con los objetos a detectar en el proceso de clasificación de datos ALS.

Como se ha comentado anteriormente, una vez realizado el proceso de filtrado, se continua con el proceso de clasificación cuya misión será la identificación de entidades registradas en la nube de puntos LiDAR. El proceso de clasificación y control de calidad realizado de forma asistida puede llegar a consumir el 80% del tiempo total del proyecto (Sithole & Vosselman, 2003). Es por ello, que se han desarrollado diferentes algoritmos en los últimos años y aún se continúa investigando en aras de conseguir una casi completa automatización del proceso.

##### 4.2.4.1. Consideraciones previas relativas a los algoritmos

El objetivo primordial de todo algoritmo de clasificación es la determinación de los objetos donde se han registrado puntos LiDAR, diferenciando lo que es terreno desnudo (a partir de hora, suelo) de objetos (edificaciones, vegetación, mobiliario urbano, etc.). Entre los posibles objetos que se dan en la realidad, se podría diferenciar entre aquellos que tienen un volumen y, por tanto, se alzan respecto del suelo una determinada altura (edificios o árboles) y los que están adosados al terreno pero no constituyen este, teniendo sólo diferencia de altura por algún costado (por ejemplo, puentes o pasarelas). Esta diferenciación conlleva un diferente grado de dificultad en la detección, puesto que los objetos adosados suelen ser más complejos de detectar.

Por otro lado, los algoritmos se podrían caracterizar en función de una serie de propiedades entre las cuales son destacables las siguientes:

- Estructura de los datos: Aunque la mayoría de los algoritmos operan con una nube irregular de puntos 3D, algunos generan una rejilla raster con datos interpolados.
- Test de vecindad y número de puntos filtrados en cada momento: Para determinar geoméricamente si un punto pertenece a un objeto o al suelo, se debe comparar con los puntos vecinos. Además, esta comparación podría ser para un solo punto o para varios en cada cálculo. Por ello, existen tres posibles tipos de comparaciones: punto a punto, punto a varios puntos y varios a puntos a varios puntos.
- Medida de discontinuidad: La mayoría de los algoritmos utilizan la medida de alguna discontinuidad geométrica para determinar si un punto es suelo o no. Esta discontinuidad se puede dar en la diferencia de altura, la pendiente, la distancia, etc.
- Concepto de filtro: Cada algoritmo tiene una suposición diferente para considerar cuando un punto pertenece a un objeto o al suelo. Se podrían considerar cuatro suposiciones diferentes: en función de la pendiente, en función del valor medio de cota de la vecindad, en función de la superficie que forman los puntos vecinos y en función de la pertenencia a una segmentación previa de la información.
- Recursividad: Los algoritmos pueden realizar la clasificación en un solo paso o en varios. Normalmente, los algoritmos basados en un solo paso son más rápidos, pero los algoritmos basados en la recursividad tienen como objetivo mejorar la clasificación realizada en pasos previos.
- Sustitución o eliminación de puntos: Una vez que un punto es señalado como perteneciente a un objeto se puede proceder a su eliminación de la nube de puntos suelo o se puede sustituir el valor de su cota en función de la cota de sus vecinos. Este método operativo es propio de los algoritmos basados en modelos de datos raster.
- Utilización de los ecos: Actualmente todos los sensores ALS registran varios pulsos de respuesta del rayo, por lo que los algoritmos actuales se han adaptado a su uso, pero no así los desarrollados en años anteriores, pues no era habitual su registro. La utilización de varios retornos que han podido atravesar la vegetación y llegar hasta el suelo, mejora notablemente los resultados, sobre todo en áreas con vegetación densa.
- Datos adicionales utilizados: La mayoría de los algoritmos sólo utilizan la información geométrica de la superficie para realizar la clasificación, aunque se pueden utilizar otros datos como la intensidad (recogida por el propio sensor) o el valor radiométrico (incorporando información de otro sensor, por ejemplo, una cámara óptica, infrarroja o térmica). Con ello, se puede mejorar la localización de

puntos pertenecientes a objetos, ya que es conocido que determinados objetos tienen respuestas de intensidad tabuladas, como puede ser la vegetación.

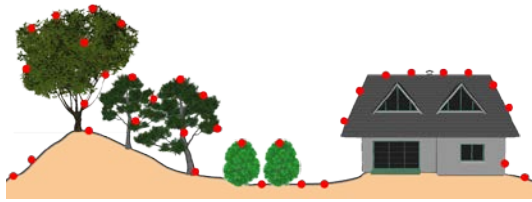


Figura 197: Puntos mostrados de manera independiente.

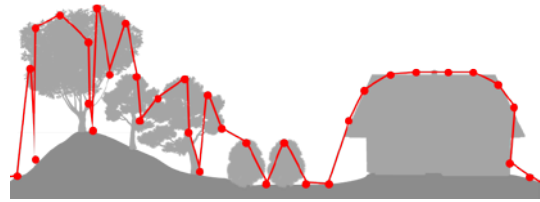


Figura 198: Línea de puntos escaneada.



Figura 199: Puntos coloreados en función del objeto al que pertenecen.



Figura 200: Entidades generadas después de la clasificación de los puntos.

Los algoritmos de filtrado se basan en el reconocimiento de una o varias propiedades características de las superficies que conforman el suelo. Estas características son:

- Las elevaciones más bajas: Normalmente, los puntos procedentes del suelo suelen definir un mínimo local.
- Pendiente: La pendiente entre dos puntos pertenecientes al suelo suele ser inferior que entre un punto del suelo y un punto de un objeto. Para considerar cuándo una pendiente calculada no es producto de dos puntos del suelo, se ha de establecer un umbral que dependerá del tipo de superficie. Esto puede resultar sencillo en zonas urbanas, pero complicado en zonas rústicas montañosas donde se pueden dar fuertes pendientes que camuflen ciertos objetos, sobre todo, vegetación baja.
- Diferencia de cota: No suele haber una gran diferencia de cota entre un punto de suelo y su entorno. Si un punto tiene una cota muy diferente a la de su entorno probablemente pertenezca a un objeto.
- Homogeneidad: Normalmente las superficies del suelo son continuas y suavizadas.

Dependiendo de la zona, no se tienen que dar todas las características mencionadas y será el algoritmo el que tome la decisión para clasificar los puntos. No obstante, los errores de clasificación suelen darse en objetos tales como arbustos, muros, puentes, edificios pequeños, taludes, riscos y zonas donde se combinen superficies con mucha y poca pendiente.

#### 4.2.4.2. Tipos de algoritmos

El éxito de una buena clasificación depende en gran medida del algoritmo utilizado, pero también de las características de la zona. Por ello, es necesario conocer el funcionamiento del algoritmo y las propiedades del terreno, pudiendo optar por uno u otro en función de sus características.

La tendencia actual de los filtros es la integración de la intensidad registrada en cada punto y datos obtenidos con otras tecnologías, por ejemplo, sensores ópticos (fotografías aéreas georreferenciadas, ortofotografías, imágenes de infrarrojo o térmicas).

Se van a considerar seis categorías diferentes de algoritmos (Meng, et al., 2010): basados en la segmentación y agrupamiento, morfológicos, en función de la dirección de escaneado, basados en las curvas de nivel, basados en triangulación y basados en interpolación.

##### a) Algoritmos basados en la segmentación y agrupamiento

La segmentación y el agrupamiento son técnicas muy utilizadas en la clasificación de usos de suelo y se ha implementado en la clasificación de nubes de puntos LiDAR. El proceso de clasificación comienza en una zona elegida como semilla, añadiendo puntos progresivamente realizando medidas sobre el plano que definen los puntos previos y desechando aquellos que, por su diferencia de cota, pertenecen a objetos. Para el cálculo de la superficie se utiliza la técnica de mínimos cuadrados con ponderación. Ofrecen buenos resultados en zonas llanas.

Un algoritmo representativo de este grupo podría ser el definido por Roggero. Es una variante del filtro morfológico desarrollado por Vosselman (Vosselman & Maas, 2001). Inicialmente, calcula una rejilla por interpolación, eliminando los errores groseros. A continuación, aplica un operador basado en la pendiente local a partir del punto con menor cota y con un criterio de regresión lineal ponderado en función de la distancia al punto, determinando los puntos pertenecientes al suelo. El umbral para decidir si un punto es objeto, se determina en el proceso de generación de la rejilla a partir de la pendiente media de la zona. Es un proceso iterativo. Puede presentar problemas debido a falsos puntos bajos y la preservación de discontinuidades, esencialmente pendientes en escalones (Roggero, 2002).

Nardinocchi propone un algoritmo que busca regiones homogéneas y conexas partiendo de un píxel semilla y evaluando las diferencias de cota con sus vecinos. Aquellos en los que esta diferencia sea menor a un umbral se incluyen en la región y se convierten en semillas de la misma. La clasificación se realiza mediante las relaciones topológicas existentes entre las diferentes regiones: regiones de pequeño tamaño aisladas se clasifican como ruido; se agrupan los segmentos pequeños juntos para ser clasificados como vegetación. Se pueden establecer otras relaciones topológicas, como por ejemplo que los segmentos de edificios tengan mayor cota que sus vecinos o que los segmentos de terreno tengan mayor tamaño que sus vecinos (Nardinocchi, et al., 2003).

El algoritmo propuesto por Mass segmenta la nube de puntos y la clasifica por medio de una serie de bandas derivadas de las alturas, al igual que se hace en clasificación multispectral de imágenes. En función de esto, se pueden generar bandas con las alturas originales, con las pendientes, con el rango de altura entorno a un punto, la varianza de altura o con el resultado de aplicar algún filtro típico de imágenes. El usuario puede elegir qué bandas utilizar en cada caso (Maas, 1999). Baatz y Schäpe también proponen un algoritmo basado en la segmentación de imágenes (Baatz & Schäpe, 2000).

Sithole y Vosselman proponen un algoritmo que segmenta la nube considerando que dos puntos pertenecen a la misma superficie si existe un camino suave a lo largo de puntos adyacentes entre ellos. Para ello utilizan segmentaciones lineales en varias direcciones, como si se trataran de perfiles, trabajando de forma iterativa, primero eliminando los objetos más claros y luego refinando el modelo de suelo. El algoritmo intenta ajustar la nube de puntos a un conjunto de grafos conexos, realizando la clasificación sobre los segmentos que forman los grafos. Destaca su mal comportamiento ante objetos bajos, terreno desconectado, edificios en pendientes y la preservación de discontinuidades (Sithole & Vosselman, 2005).

El algoritmo OBA (*Object-Based Analysis*) se basa en la organización de los puntos bajo una rejilla, de tal forma que acelera el proceso de búsqueda de puntos vecinos. Inicialmente, elimina los puntos groseramente hundidos, resultado de alguna medición incorrecta y procede a buscar mínimos locales en cada celda. A partir de los puntos con la cota mínima, calcula las pendientes entre los puntos de celdas vecinos y procede a su clasificación (Yan, et al., 2012).

Otro algoritmo, el cual precisa de edición para afinar los resultados, es el propuesto por Jiang y Ming (Jiang & Ming, 2006).

## b) Algoritmos morfológicos

Estos algoritmos están basados en la utilización de la forma de los objetos para reconocer aquellas formas que no son suelo desnudo. Suelen ser iterativos y necesitan del conocimiento previo de la zona para detectar las posibles formas. Pueden tener problemas si los objetos presentan tamaños muy diferentes, puesto que se debe emplear una zona de estudio. Para solucionarlo, algunos de ellos reconstruyen las zonas cuando se detecta un objeto y otros van cambiando el tamaño de la zona de estudio gradualmente. Zhang combina este algoritmo con otro de pendiente máxima y diferencia de altitud, obteniendo mejores resultados (Zhang, et al., 2003). Otra propuesta, comienza con un tamaño de zona de estudio pequeño para eliminar la mayoría de la vegetación y termina con un tamaño mayor para la detección de objetos más grandes, por ejemplo, edificios.

Otro algoritmo representativo de este grupo podría ser el definido por Arefi y Hahn basado en el concepto de dilatación geodésica (Arefi & Hahn, 2005).

Sithole utiliza un elemento estructural (un cono invertido) centrado horizontalmente sobre un punto y por debajo de él. Se realiza un movimiento vertical y se detiene cuando la



estructura encuentra un punto. Si el punto encontrado no es el punto en el que se centró, se considerará al punto central como objeto y al punto encontrado como suelo. El elemento estructural se caracteriza por su pendiente, que se determina en un paso previo en función del tipo de superficie. Al utilizar la pendiente para clasificar puede tener problemas debido a falsos puntos bajos o en las terrazas (Sithole, 2001).

Wack y Wimmer proponen un método basado en el cálculo de una rejilla jerárquica. Inicialmente, se utilizan celdas de nueve metros para localizar grandes edificios y vegetación densa, donde cada celda toma la cota más baja del 99% de los puntos para evitar errores groseros. El algoritmo utiliza un filtro LoG (Laplaciano del Gausiano) suponiendo que los grandes objetos producen cambios bruscos en la superficie. A continuación, se calcula una rejilla de celdas de tres metros, utilizando nuevamente el filtro LoG para localizar objetos. En este caso, se utiliza la desviación estándar en el cálculo de la cota de cada celda como peso en los datos obtenidos por el filtro. En el siguiente paso, se calcula una nueva rejilla con celdas de un metro, repitiendo el proceso. Precisa un bloque mínimo, presentando problemas con objetos de pequeño tamaño como automóviles o árboles (Wack & Wimmer, 2002).

### c) Algoritmos en función de la dirección de escaneado

Estos filtros utilizan consideraciones realizadas en 2D, es decir, a lo largo de línea de escaneado registrada en vuelo. Calculan la pendiente o la diferencia de altitud entre puntos registrados en una determinada misma zona, es decir, se establece un ámbito previamente. Al ser relaciones relativamente pobres, pueden tener problemas en algunas zonas, provocando líneas de puntos erróneamente clasificados. Para paliar este defecto, Meng desarrolló un algoritmo (MGF, *Multi-directional Ground Filtering*) que permite buscar puntos en 2D mediante una reorganización raster (Meng, et al., 2009).

### d) Algoritmos basados en las curvas de nivel

El modelado activo es uno de los métodos utilizados para la extracción de curvas de nivel y también se utiliza para la extracción del terreno de una nube de puntos LiDAR. Se basa en la eliminación de puntos en función de la fuerza de la gravedad y de atracción entre zonas. De todas formas, en algunas zonas es necesario utilizar otros algoritmos para depurar los resultados.

Un algoritmo representativo de este grupo podría ser el definido por Elmqvist, que estima la superficie del suelo mediante un modelado activo a partir de la minimización de la energía como si se tratara de una membrana que envuelve a todos los puntos y reposa en un estado de mínima energía. Matemáticamente utiliza splines en dos dimensiones y comienza a partir del punto de cota más baja. Aquellos puntos que precisen de mucha energía para deformar la spline serán considerados objetos. Permite diferenciar entre edificios y vegetación e identificar árboles individuales (Elmqvist, 2001).

### e) Algoritmos basados en triangulación

Uno de los filtros pertenecientes a este grupo es el denominado VDF (*Virtual Deforestation Filter*) que permite eliminar puntos asumiendo que el terreno cambia de una manera progresiva y suave sin grandes alteraciones. De esta forma, aquellos puntos donde se produzca una fuerte curvatura debido a su cota, se considerará que no es terreno y será eliminado. De la misma manera, se actúa con determinadas depresiones. El algoritmo calcula inicialmente un TIN para obtener una rejilla que se suaviza para obtener los valores de las curvaturas. Se necesitan dos parámetros para definir la curvatura máxima del terreno y la máxima depresión de este. Es iterativo. Es efectivo con puentes y pequeños edificios, pero tiene dificultades con grandes edificios que no tengan muchas plantas y con algunas depresiones.

Axelsson también propone un método por medio de un TIN al que se le van añadiendo puntos de forma progresiva en función de la diferencia de cota y el valor del ángulo de los triángulos. Es adecuado en discontinuidades y también es iterativo (Axelsson, 2001).

Sohn y Dowman utilizan un proceso de dos pasos para densificar un TIN. Primeramente, se realiza una densificación “hacia abajo”, cuyo propósito es obtener una representación inicial del terreno. Se genera un rectángulo que envuelve la nube de puntos, considerando que los puntos más cercanos a cada uno de los vértices pertenecen al terreno. A continuación, se realiza una triangulación de Delaunay con las esquinas y se recalcula progresivamente la triangulación introduciendo aquellos puntos que queden por debajo de cada triángulo. En el segundo paso, se realiza una densificación “hacia arriba”, cuyo objetivo es el refinamiento de la triangulación anteriormente obtenida. Utiliza una distancia vertical para decidir si los puntos son objeto o no, calculando el tetraedro formado por un punto y el triángulo donde se encuentra. Se seleccionarán aquellos puntos que generen el tetraedro más plano (Sohn & Dowman, 2002).

Otro algoritmo de este tipo podría ser el planteado por Morgan y Habib, basado en TIN y criterios morfológicos de los objetos (Morgan & Habib, 2001).

### f) Algoritmos basados en interpolación

Existe un gran número de filtros basados en interpolación que van clasificando puntos en función de la diferencia de cota respecto de la interpolación con puntos de su entorno. Se debe generar un proceso iterativo para eliminar los puntos y que no afecten en el proceso de iteración. Se pueden aplicar interpolaciones mediante mínimos cuadrados, splines u otros modelos estadísticos.

Pfeifer y Stadler proponen un método jerárquico, en el que en cada nivel se realiza una interpolación robusta para la superficie clasificando los datos. El proceso comienza con el cálculo de una interpolación burda del terreno al que se le van añadiendo puntos progresivamente, dando pesos a cada uno de ellos en función de su posición respecto de la

superficie. Los puntos situados por encima de la superficie se les asignan un peso menor que los situados por debajo, de tal forma que se realiza una nueva interpolación, generando una superficie más cercana a los puntos bajos. El proceso es iterativo, clasificando los puntos como suelo u objeto en función de su diferencia de cota respecto de la superficie de interpolación calculada. Utiliza una gran cantidad de parámetros para una clasificación fina (hasta cien) y es el algoritmo utilizado por el programa SCOP (Pfeifer & Stadler, 2001).

Brovelli estructura su propuesta en cinco pasos. Primeramente, realiza un pre-proceso de la información para eliminar los errores groseros mediante una interpolación bicúbica utilizando splines. Las splines se configuran en función de la resolución de la nube. A continuación, se realiza una detección de bordes mediante la generación de teselas donde se emplean nuevamente splines bicúbicas. Se utilizan dos juegos diferentes de splines utilizando parámetros para ajustarse más a los datos originales o para obtener la mejor interpolación con la mínima curvatura. La diferencia de cota de los puntos entre ambas splines aportará la información para clasificar un punto. El tercer paso consiste en generar una rejilla donde se categorizan las celdas en función de la existencia o no de dobles pulsos, comenzando por los puntos encontrados en el paso anterior y generando formas convexas. El cuarto paso es un proceso iterativo de corrección de los puntos clasificados como suelo en los pasos anteriores. Nuevamente, se utilizan splines bicúbicas para interpolar, minimizando la curvatura. En este caso, se diferencia la vegetación del resto de objetos en función de los pulsos recibidos. Por último, se calcula un modelo digital basado en rejilla con los puntos clasificados con suelo (Brovelli, et al., 2002).

#### 4.2.4.3. Clasificación por intensidad

Además de la información sobre la posición, la mayoría de los sistemas registran la intensidad de cada pulso recibido. La intensidad representa las características de reflectancia de la superficie en el espectro del infrarrojo cercano, en el rango de longitudes de onda entre 800 nm y 1550 nm. La intensidad permite diferenciar fácilmente diferentes tipos de superficie, por ejemplo, vegetación de suelo desnudo. Los algoritmos basados en suposiciones geométricas permiten extraer con más o menos éxito los objetos de la superficie, pero en zonas complicadas donde la pendiente del terreno se pueda confundir con la altura de los objetos pueden dar problemas de interpretación. En estos casos se podrían utilizar suposiciones basadas en la diferencia de intensidad, por ejemplo, en terrenos escarpados con vegetación densa.

La intensidad registrada por el sensor LiDAR está condicionada por las propiedades de la superficie como la reflectancia, contenido de humedad o su rugosidad y la geometría descrita por el rayo. Esta geometría depende, a su vez, de varios parámetros como la altura de vuelo, la orientación del punto registrado respecto del sensor (que depende del ángulo de escaneado y la topografía), el tamaño de la huella láser y la atmósfera (Yunfei, et al., 2008). Actualmente, no se tienen datos suficientes para valorar la influencia de estos factores sobre la intensidad, aunque experimentalmente se conocen algunos comportamientos. Por ejemplo, la intensidad no se ve afectada cuando el ángulo FOV es inferior a 10°. Además, se puede suponer que el tamaño de la huella del láser y la atmósfera no varían para un mismo

vuelo, por lo que la interpretación de los datos de intensidad se simplifica. También es conocido que la intensidad LiDAR se incrementa con la reflectancia del objeto y se reduce con la distancia entre este y el sensor. Según esto, habrá diferencias entre la intensidad recibida de un pulso procedente de vegetación o procedente del suelo desnudo, ya que la reflectancia de la vegetación es superior que la del suelo en una longitud de onda de 1064 nm y porque la altura de la vegetación es superior que la del suelo (menor distancia, por tanto). Sin embargo, el valor de la intensidad registrado para la vegetación es mucho menor que la del suelo y esto es debido a que el área del pulso sobre el follaje del árbol es mucho menor que el pulso sobre suelo desnudo.



Figura 201: Nube de puntos LiDAR visualizada mediante la intensidad registrada por el sensor.

Algunos algoritmos utilizan estas propiedades para clasificar vegetación en entornos rústicos. Otros, utilizan esta información de manera conjunta a la información geométrica para mejorar la clasificación de los objetos. Sin embargo, un buen comportamiento en un entorno rústico no asegura un buen funcionamiento en otros casos. Sería deseable disponer una tabla de correspondencia entre valores de intensidad y tipo de superficie. La NASA ha desarrollado un catálogo con los espectros de respuesta de los distintos materiales que pueden encontrarse sobre la corteza terrestre. El uso de estas tablas puede ser de gran ayuda en los procesos de clasificación de datos LIDAR, ya que conociendo la respuesta específica de cada material, es posible clasificar los puntos según el nivel de intensidad que presenten.

En cualquier caso, son tablas generales sin normalizar y obtenidas para unas condiciones de toma muy definidas. Para poder utilizarlo en procesos de clasificación, es necesario normalizar estos valores para el tipo de sistema LiDAR utilizado, ya que dependiendo del sensor, la longitud de onda tendrá un valor fijo. Una vez definida la longitud de onda del sistema, es posible obtener directamente la reflectancia de material. Estos valores de reflectancia simplemente son un valor de referencia, puesto que en la práctica tendrán pequeñas oscilaciones.

#### 4.2.4.4. Clasificación multiespectral

Basándose en una idea similar a la expuesta en el apartado anterior, es posible utilizar la información multiespectral a partir de los datos adquiridos por otro sensor y cuya georreferenciación permitiera incorporarlos a la nube de puntos LiDAR. Estos sensores podrían ser cámaras ópticas de medio o gran formato, cámaras infrarrojas o cámaras térmicas. Esta información podrá haber sido adquirida en el mismo momento de la toma de datos LiDAR o en otro momento. Además, también podría utilizarse la información almacenada en ortofotografías de la zona, cuya georreferenciación sea conocida.

La combinación de imágenes con información multiespectral en proyectos LiDAR ofrece interesantes ventajas. La principal ventaja reside en la identificación inequívoca de objetos sobre ellas, puesto que suelen corresponder al espectro visible. Esta posibilidad permitirá la toma de decisiones en casos complejos o para realizar un control de calidad visual de los resultados de clasificación. Otra ventaja es la utilización de los datos adquiridos para la clasificación automática de objetos, como complemento de algoritmos geométricos. De esa forma, se podrían modificar las condiciones de clasificación para que también se cumplan condiciones de respuesta radiométrica de determinados objetos, por ejemplo, cubiertas de edificios o vegetación cuya respuesta en el espectro visible es clara. En relación con la clasificación de vegetación podría ser de mayor interés la utilización de imágenes en el infrarrojo puesto que responde al porcentaje de humedad existente en el objeto.

Para asegurar la correcta clasificación de los objetos en la utilización de información multiespectral, debe haber una perfecta correspondencia entre la georreferenciación de los datos LiDAR y de la imagen. Si existe un pequeño error, se transmitirá a la clasificación, puesto que no se asignarán los valores adecuados a los puntos LiDAR. Además, existirán problemas con aquellos objetos que están en movimiento, puesto que no tendrán correspondencia entre ambos conjuntos de datos, como puede ocurrir con los automóviles. Por último, en la clasificación de datos, no se suele trabajar con las componentes RGB, sino que se trabaja en el formato tono, valor y saturación (HSI). El formato RGB es sólo utilizado en la visualización de datos.





Figura 202: Nube de puntos LiDAR visualizada con el color RGB asignado con fotografía aérea.

#### 4.2.5. Control de calidad

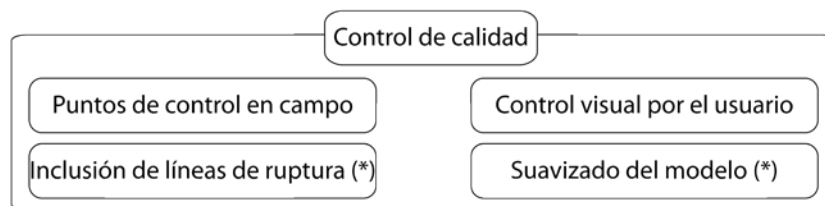


Figura 203: Gráfico con las operaciones a realizar en el control de calidad de datos ALS.

El control de calidad de los resultados obtenidos en la clasificación precisa la medición e identificación, mediante otro sistema de registro como pueden ser los basados en topografía, geodesia o fotogrametría. En este sentido, resulta compleja la perfecta identificación de los puntos LiDAR, puesto que estos no son medidos en ningún lugar en concreto ni tienen continuidad espacial, por lo tanto, sólo podrá ser comprobada su precisión geométrica por interpolación de datos. No obstante, se podrá tomar una cantidad de registros significativa para que la interpolación sea lo más correcta posible.

Por tanto, la toma de datos para realizar el control de calidad deberá registrar puntos de control altimétrico sobre superficies y los límites de aquellas que hayan sido identificadas. Además, este registro de información podrá ser incorporada al modelo digital que se genere posteriormente aumentando la precisión de este. Por ejemplo, será de gran interés en el caso de líneas estructurales registradas mediante restitución fotogramétrica.





Figura 204: Ejemplo de nube de puntos LiDAR mostrada con la clasificación de los puntos más la imagen cónica aérea como fondo.

Por otra parte, el control geométrico realizado mediante alguna otra técnica geomática, se puede realizar un control visual asistido por el usuario haciendo uso de información adicional procedente de algún otro sensor, como pueden ser fotografías aéreas u ortofotos (figura 204). Este proceso rápido y expedito puede ser válido para comprobar la clasificación realizada por el algoritmo o herramienta utilizada.

Existen diversos algoritmos que buscan la extracción de la definición planimétrica de las líneas estructurales. Muchos de estos algoritmos se basan en operaciones realizadas con archivos de imagen raster, por lo que precisan generar un modelo de rejilla con la información LiDAR del terreno desnudo. Otros pueden realizarlo con el modelo TIN buscando los límites de superficies ajustadas por MM.CC. a un conjunto de puntos.

Estas líneas de ruptura mejorarán la representación del relieve generada a partir de la nube de puntos. Además, son un importante punto de partida para proceder a un filtrado de todos aquellos puntos que no son de interés para la representación del relieve. En este sentido, es necesario recordar que la técnica de recogida de la información LiDAR (como otras, por ejemplo, InSAR) no es selectiva como la restitución fotogramétrica, por lo que se genera una alta densidad de puntos, muchos de ellos de escaso interés altimétrico. Existen algoritmos que pueden reducir el volumen de la información hasta en un 94%, eliminando los puntos de información redundante o poco significativos (Briese, et al., 2007).

Por último, con las líneas de ruptura y la nube de puntos filtrada, se podría realizar un suavizado del modelo digital para dar la continuidad que tiene el terreno en la realidad eliminando pequeñas protuberancias u hoyos. Normalmente, esta operación se realiza con modelos digitales basados en rejilla utilizando el ajuste de superficies matemáticas como splines bicúbicas (Arranz, 2008).

#### 4.2.6. Modelo Digital del Terreno y de Superficies

El último paso en el proceso de modelado a partir de datos LiDAR es la generación de los modelos digitales que deberán definir altimétricamente la zona. Al respecto, se podrían considerar dos tipos de modelos, Modelo Digital del Terreno (MDT) y Modelo Digital de Superficies (MDS), tal y como se describió en el apartado 3.3.3.2. En este momento del proceso, se tienen todos los puntos clasificados por lo que se podrán elegir qué datos se desear modelar en el MDS. Por ejemplo, se podría elegir representar sólo edificaciones para propósitos catastrales o sólo vegetación para aplicaciones forestales.

Los formatos de ambos tipos de modelos también pueden ser variados. Tradicionalmente, se han utilizado modelos digitales vectoriales (TIN) o raster (DEM). Sin embargo, algunas aplicaciones también permiten realizar cálculos utilizando directamente la nube de puntos LiDAR. Esta última opción es consecuencia de la alta densidad de datos que se disponga, pudiendo realizar fáciles interpolaciones espaciales con errores poco significativos. Además, ofrecen la ventaja de no tener que calcular las relaciones de vecindad (como ocurre en los TIN) ni precisar la generación un archivo adicional e interpolado (como ocurre en los DEM). Por otro lado, la interpolación de datos permitirá reducir el error que originalmente pudieran tener los puntos LiDAR. Además, se pueden aplicar fácilmente algoritmos de suavizado basados en splines bicúbicas sobre los modelos digitales raster mejorando los resultados (Arranz, 2008). Los modelos TIN permiten la incorporación de datos vectoriales adicionales que suponen una mejora del modelado como pueden ser las líneas estructurales. Sin embargo, tienen el inconveniente del cálculo de las relaciones de vecindad que consumirá tiempo computacional. Además, los archivos generados requieren mayor capacidad que los anteriores.

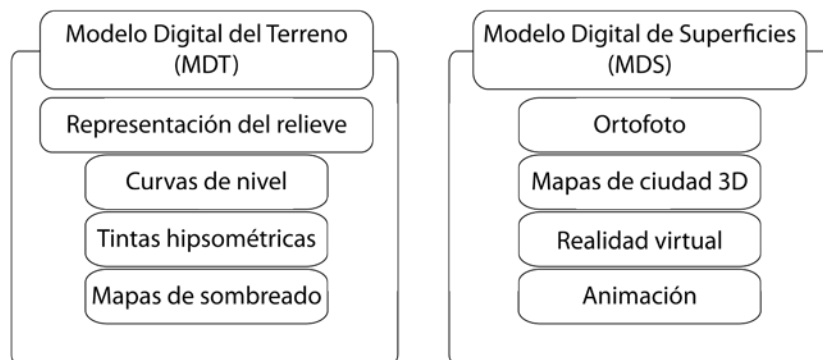


Figura 205: Gráfico con las operaciones a realizar con el MDT y con el MDS.

Las aplicaciones derivadas habituales del MDT son los mapas de representación del relieve, sobre todo mediante curvas de nivel. No obstante, también podrán generarse otros tipos de mapas como tintas hipsométricas, sombreados, pendientes, orientaciones o de visibilidad.



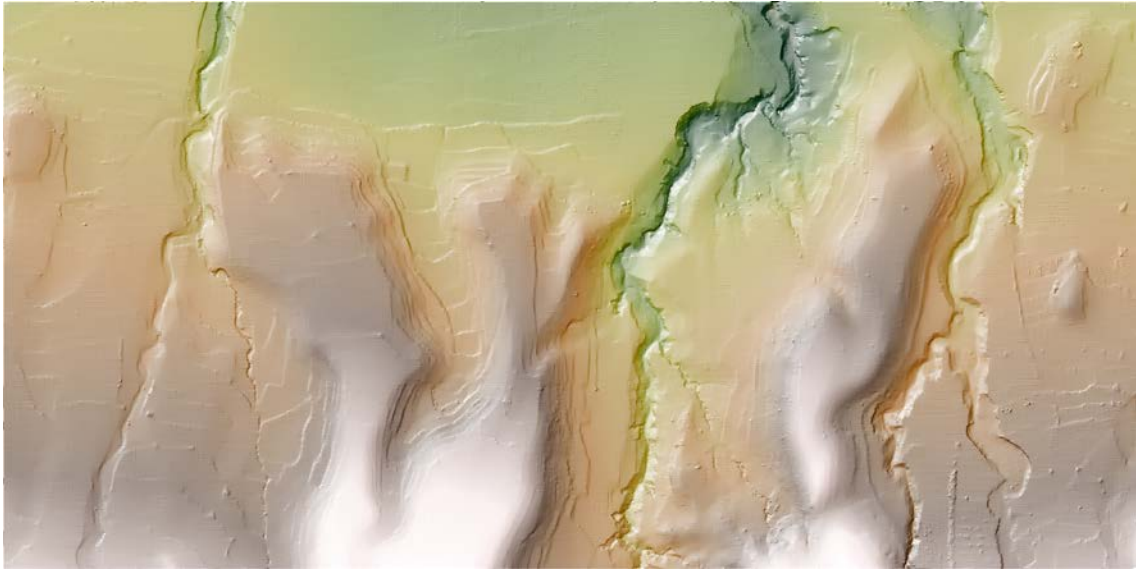


Figura 206: Ejemplo de mapa de tintas hipsométricas calculado a partir de nube de puntos LiDAR.

Aprovechando la detección de objetos y su definición geométrica por medio de los puntos medidos, las aplicaciones habituales del MDS están relacionadas con la representación virtual de la realidad: ortofotografías, modelos de ciudad 3D, animaciones, etc.

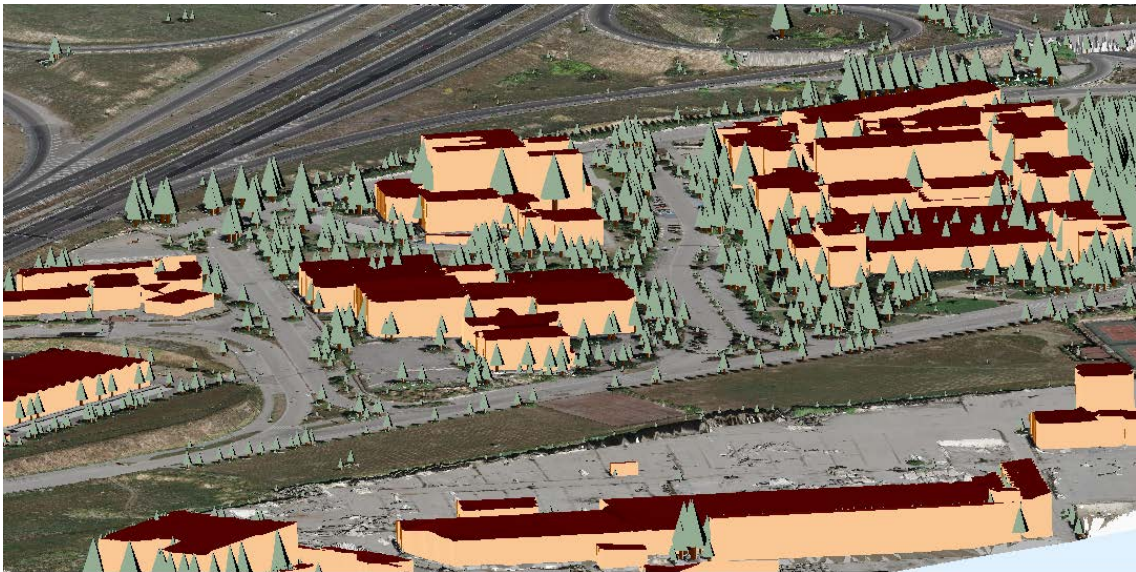


Figura 207: Modelo digital de terreno texturizado con la ortofoto más objetos con las edificaciones y arbolado de la zona.

Por otro lado, se pueden realizar cálculos de comparación entre el MDT y el MDS que permiten evaluar el volumen de edificación o vegetación de una zona. Este último cálculo es importante en aplicaciones forestales generando un CHM (*Canopy Height Model*).

## 4.3. Láser terrestre

### 4.3.1. Introducción

Como se vio en el capítulo anterior, los escáneres láser terrestres pueden clasificarse en función de si permanecen estáticos (TLS) o se mueven instalados sobre un vehículo (MMS), normalmente un vehículo. En el caso de MMS, el tipo de objeto medible son los elementos típicos de las infraestructuras urbanas: viales, mobiliario urbano, estructuras de ingeniería civil, etc. En el caso de TLS, el abanico es mucho más amplio puesto que permitirán el registro desde amplias zonas del terreno (un yacimiento arqueológico, un parque, una fachada arquitectónica, etc.) hasta pequeños objetos. No obstante, el resultado de la medición es básicamente el mismo, diferenciándose en el modo de capturar la información.

### 4.3.2. Captura de datos

Antes de realizar la captura de datos, se debe realizar un análisis del objeto a medir teniendo en cuenta el pliego de prescripciones técnicas que establece la precisión con la que se ha de registrar. El objeto, su entorno y la precisión requerida serán determinantes para elegir el sistema TLS apto para la medida así como para la determinación de algunos de los parámetros necesarios para el proceso de medición: densidad de puntos, distancia máxima al objeto, ángulo máximo de reflexión, sistema de referencia, necesidad de datos multispectrales, accesibilidad, temperatura, etc.

Al contrario que en el registro mediante ALS, en TLS no existe un flujo de trabajo estándar para el registro ya que depende enormemente de las dimensiones y distribución del objeto a medir. No obstante, se deben resaltar determinados aspectos para conseguir resultados óptimos.

Un reconocimiento previo de la zona o la utilización de documentación del objeto ayuda en la planificación del proyecto. Si el objeto requiere varios estacionamientos para un registro completo, se deberán tener en cuenta las posibles ocultaciones o sombras que otros elementos próximos pueden provocar. Además, se deberá tener en cuenta si el objeto está bajo cubierta o al aire libre pues condicionará la manera de realizar las uniones de las diferentes nubes de puntos. Por ejemplo, bajo cubierta no se podrán utilizar receptores GNSS por lo que el registro directo se puede complicar, teniendo que recurrir a técnicas topográficas.

Si se decide realizar un registro indirecto apoyado sobre placas de puntería, habrá que establecer el emplazamiento más adecuado de dichas placas. Al respecto, habrá que tener especial atención a posibles movimientos inesperados por lo que deberán ser localizadas con cuidado y en lugares protegidos. Estas marcas de puntería podrían sustituirse por puntos de control con coordenadas conocidas calculadas previamente con alguna otra técnica de

medición, por ejemplo, topografía clásica. Si este fuera el caso, se debe asegurar que la precisión de las coordenadas de estos puntos es superior a la requerida para el registro del objeto. Además, se deberá asegurar que haya al menos tres puntos de control o placas de puntería en los diferentes solapes entre estacionamientos.

### 4.3.3. Registro de la información

Una vez seleccionado el tipo de registro (directo o indirecto), se debe realizar un anteproyecto con la posición idónea del escáner para realizar la medición. La posición vendrá determinada por: las dimensiones del objeto (se deberá cubrir toda su extensión); la densidad mínima de puntos, es decir, la resolución o distancia máxima entre puntos registrados condicionada por el nivel de detalle que se desea del objeto; la distancia máxima al objeto, que vendrá determinada por la precisión que se desea del objeto; el ángulo máximo de reflexión, también en función de la precisión que se desea pues cuanto más se aleje del ángulo de  $90^\circ$  peor será la determinación del punto a medir. Tanto el ángulo máximo de reflexión como la distancia máxima de medición vienen condicionados por la huella generada por el láser en el objeto (apartado A.4.1.1). Cuanto mayor sea ésta, peor es la medición.

Es muy importante elegir una adecuada resolución de escaneado. No debe ser demasiado baja, para no perder detalles del objeto, pero tampoco demasiado alta, pues aumentará innecesariamente la cantidad de puntos registrados, dificultando las posteriores tareas de tratamiento de los mismos: edición y modelado de los datos. La resolución elegida condiciona la distancia máxima de escaneado según la resolución angular del equipo. Para fijar adecuadamente el valor de resolución se debería seleccionar el punto más alejado del escaneado en cada estacionamiento. Por otra parte, se deberían intentar realizar el menor número de estacionamientos para reducir tiempos de registro y, por tanto, costes.

El ángulo máximo de reflexión podría condicionar enormemente registros realizados sobre objetos de gran altura, como torres de iglesia o edificios. En este caso, podría ser necesario el empleo de estructuras en forma de andamio. Igualmente ocurriría en el registro de suelos o elementos semienterrados, como mosaicos, zonas funerarias, huellas o restos de óseos o petroglifos. En tal caso, sería adecuado el registro desde un lugar elevado.

Si se ha decidido realizar un registro indirecto, se debería decidir el emplazamiento de las marcas de puntería para realizar el ensamblaje de las nubes. Deberían estar distribuidas espacialmente para poder calcular sin error los parámetros de transformación 3D. Estas dianas se registrarán en un proceso independiente pues se miden con una resolución muy alta para calcular adecuadamente su posición.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta si se desean obtener coordenadas en algún sistema de referencia externo. Si es así, se deberían dar coordenadas al menos a dos estaciones o dos placas de puntería mediante técnicas topográficas-geodésicas. Este paso se puede obviar si se han realizado medidas sobre puntos de control de coordenadas conocidas, pues georreferenciarán directamente las nubes de puntos. A partir de estas coordenadas y

como unión de los diferentes escaneados, se podría georreferenciar todo el proyecto en el sistema de referencia elegido.

Por último, se debería considerar la posibilidad de realizar el registro mediante alguna cámara óptica de la respuesta multispectral del objeto. La mayoría de los escáneres láser llevan equipados una cámara de baja resolución con la que es posible almacenar el valor del color RGB en cada punto medido. Esta información ayudará en la edición de los datos pero no permitirá generar documentos en base a ella por no tener la densidad suficiente. Por ejemplo, no sería posible calcular una ortofoto. Por ello, se aconseja realizar fotografías adicionales con cámaras de medio formato que deberán relacionarse posteriormente con la nube de puntos láser. Algunos escáneres permiten acoplar en su eje de muñones una cámara para tal efecto, de tal forma que se tendría una imagen con el mismo punto de vista que el escaneado.

#### 4.3.4. Modelado

A diferencia de los datos procedentes de ALS, la edición de los datos de escáneres láser terrestres apenas presenta automatización. La extracción de información o cálculo de superficies presenta una importante componente de edición manual lo que incrementa los tiempos y, por tanto, los costes del proyecto.

Una vez que se ha realizado el registro de la información, se edita mediante potentes aplicaciones informáticas que deben permitir la gestión de decenas de millones de puntos. Cada punto vendrá definido por su terna de coordenadas en el espacio más un conjunto de atributos. Estos atributos dependerán del escáner utilizado y podrían contener el valor de reflexión del material, el color RGB de la superficie, el número de eco y el vector de unión con el escáner. Algunos de estos atributos no son registrados directamente por el sensor pero se pueden añadir en un proceso posterior. Por ejemplo, el color puede añadirse a partir de los datos registrados por una cámara externa, ayudando en la fase de identificación de puntos. Otras aplicaciones, necesitan calcular el vector característico de la superficie para su representación, generando sombras artificiales para aumentar la sensación de realismo.

Una tarea fundamental sería la unión de las nubes de puntos en un único sistema de referencia. También podría ser necesario realizar las transformaciones necesarias para representar los puntos en un sistema de referencia arbitrario o global.

Con todos los puntos bajo el mismo sistema de referencia, se suelen realizar tareas de pre-procesamiento de la información, eliminando puntos mal medidos o medidos en zonas no deseadas (Sotoodeh, 2007). Asimismo, podría interesar realizar un remuestreo en zonas donde no sea necesaria una alta densidad de puntos, como superficies planas. Esta tarea debe realizarse con especial rigor para no eliminar puntos que puedan resultar de interés.

Como es sabido, el láser registra de manera no selectiva por lo que podría ser interesante registrar manualmente ciertos detalles del objeto medido obviados por el escáner. Por ejemplo, con ayuda de herramientas CAD, suele ser habitual añadir bordes



lineales de elementos como ventanas, dinteles, cornisas, etc. Para realizar esta tarea se podrían utilizar como fondo imágenes registradas adicionalmente con una cámara. De esta forma, se pueden registrar los bordes identificando sobre la imagen e interpolando las coordenadas a partir de la nube de puntos láser. Además, no siempre es posible medir puntos en toda la superficie por lo que en algunas zonas habrá que realizar interpolaciones de puntos para evitar posibles huecos en el modelado posterior.

A continuación, se pueden realizar análisis de la superficie registrada. Los cálculos previos a estos análisis dependerán de la utilidad que se dé a los datos. Por ejemplo, se pueden realizar directamente perfiles sobre la nube de puntos, sin tener que realizar ningún cálculo adicional. Las tareas comunes a realizar con los datos consistirían en el cálculo de superficies y sus bordes, agrupamiento en función de la posición espacial de los puntos (*clustering*), agrupamiento o segmentación de puntos en función del objeto medido o la clasificación de los puntos en función de tipo de superficie. La segmentación y la clasificación permitirán el aislamiento de puntos en función de objeto o superficie medida por lo que se podrán realizar análisis diferenciados.

El tipo de modelado también dependerá del objeto del proyecto y podrá ser mediante un modelado estocástico, mediante superficies, mediante el ajuste de primitivas matemáticas o mediante superficies de forma libre. Para esta tarea, será de gran utilidad si previamente se ha realizado una clasificación o segmentación de la información. Por ejemplo, con los puntos separados en función del objeto que se ha medido se pueden ajustar, a cada conjunto, formas matemáticas como cilindros, esferas o planos. Todos ellos tendrán problemas con el ruido existente en la medición láser.

El modelado estocástico tratará de ajustar líneas o superficies basándose en la estadística, utilizando la nube de puntos como el modelado final. Es el modelado más simple.

El modelado mediante superficies calculará superficies a partir de la nube de puntos. Este cálculo se realiza mediante la triangulación de Delaunay sobre superficies aisladas previamente o tendrá que ser realizado con algoritmos más complejos como la tetraedrización de Delaunay. En el primer caso, se necesitará un proceso posterior para unir las triangulaciones generadas en un único modelo, lo cual puede generar problemas en las intersecciones. En el segundo caso, se genera un modelo continuo pero complejo en su cálculo y edición. Además, este modelo puede presentar huecos de difícil solución automática.

A partir del modelado de superficies, se pueden ajustar primitivas matemáticas volumétricas. Estas primitivas pueden ser formas simples como cilindros, prismas o esferas, pero también más complejas como resultado de la intersección de varias superficies simples. Es un método muy utilizado en el registro de interiores de fábricas o industrias donde se dan gran número de tuberías, vigas y otros elementos de geometría predefinida.

Cuando el objeto medido no presenta una distribución tan predecible, se pueden ajustar superficies de forma libre a la nube de puntos. Este ajuste suele realizarse en trozos utilizando NURBS o splines superficiales de tipo  $C^0$ ,  $C^1$  o  $C^2$ , según la continuidad que se

desea dar a los datos. Las superficies  $C^0$  implican sólo continuidad en el dato. Las superficies  $C^1$  implican continuidad en la primera derivada, es decir, la pendiente. Y las superficies  $C^2$  implican continuidad en la segunda derivada, es decir, la curvatura (Arranz, 2008).

A continuación, se muestra un ejemplo de registro de un monumento mediante TLS y modelado según algunos de los métodos propuestos (Briese, et al., 2003).

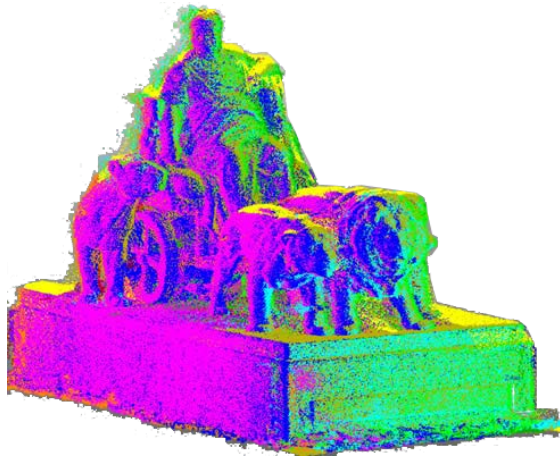


Figura 208: Nube original.

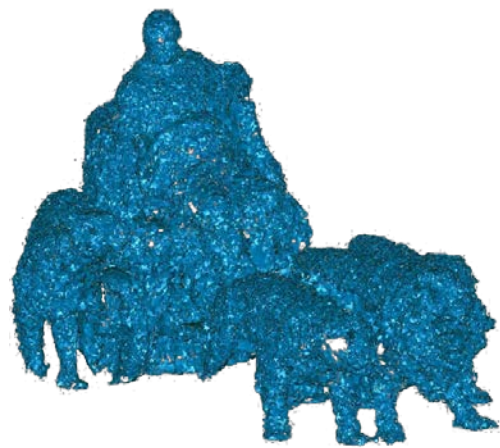


Figura 209: Representación de la triangulación calculada.



Figura 210: Representación de la triangulación suavizada.

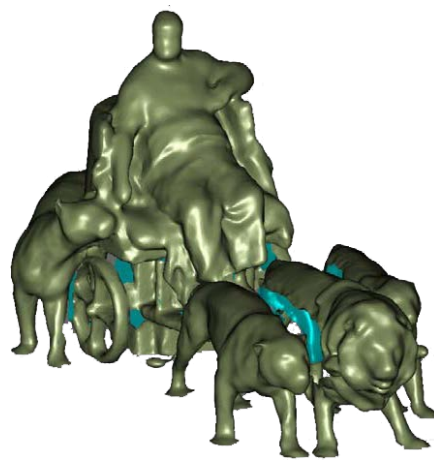


Figura 211: Representación mediante NURBS ajustadas a trozos.

### 4.3.5. Aplicaciones

Una vez que se tiene un modelo correcto del objeto medido, se está en disposición de obtener datos derivados de la medición. Normalmente, el modelo generado no es de utilidad por su complejidad y tamaño. Los datos de trabajo habituales suelen ser planos en 2D con curvas nivel, perfiles o definición de los bordes de las superficies encontradas. Estos datos pueden ser gestionados con facilidad por herramientas CAD como AutoCad o MicroStation. Por ello, se debería disponer de un conjunto de herramientas que permitan extraer estos datos de forma automática.

Por otro lado, los complejos modelos tridimensionales pueden servir para realizar réplicas o construcción de moldes para la fabricación en cadena.

Si se dispone de imágenes registradas con una cámara fotográfica, se podría calcular la ortofotografía. Este tipo de datos raster es muy demandado y, debido a las propiedades tridimensionales de los datos, se debería indicar el plano de rectificación de la ortofoto.

Por último, a partir del modelo digital y los datos multiespectrales del objeto, podría generarse un video recorriendo el objeto alrededor y mostrando todas sus principales características.

# Optimización y propuesta de modelos

## 5.1. Introducción

### 5.1.1. Objetivos y planteamiento

El objetivo fundamental de esta tesis se centra en la propuesta de una metodología optimizada para el modelado de datos procedentes de medidas realizadas con sensores de barrido láser para su explotación posterior en documentación patrimonial. Esta metodología utilizará como base los fundamentos expuestos en capítulos anteriores acerca de la estructura y naturaleza de la información registrada con estos sensores, así como las propuestas de diferentes algoritmos. No obstante, se propondrán algoritmos novedosos y herramientas específicamente desarrolladas, que posteriormente serán evaluadas para comprobar su validez.

Existen diversos ámbitos de aplicación de este tipo de medidas, en función del objeto registrado, pero todos ellos tienen un factor común: la estructura de los datos medidos condicionada por el sistema de medida empleado. Estos datos se componen de nubes muy densas de puntos que caracterizan al objeto de forma geométrica y, en la mayoría de las veces, también radiométricamente.

Por ello, a continuación se expondrán los diferentes algoritmos y/o herramientas que se proponen y que se han desarrollado para llevar a cabo este proceso de modelado. Su utilidad dependerá del objeto que se esté tratando y así se establecen herramientas exclusivas para sensores aerotransportados (ALS) y para sensores en tierra (TLS o MMS). La mayoría de las herramientas son inéditas y desarrolladas para este documento. Además han sido probadas con datos reales y comparadas con los resultados obtenidos con aplicaciones informáticas comerciales o algoritmos existentes en el mercado y con otros sistemas de medida (fotogrametría y registro GNSS).

Este capítulo se inicia con la exposición de las técnicas y métodos para poder generar entidades superficiales o volumétricas a partir de la información láser. Como se ha analizado exhaustivamente en capítulos precedentes, esta información es muy densa pero discreta, por lo que se precisará algún método que genere las relaciones internas para convertir la nube de

puntos en una superficie, o un volumen. Se diferenciará entre los modelos 2D (con datos de altura, denominados 2.5D) y los modelos 3D. Básicamente, los primeros serán los utilizados a partir de datos procedentes de sensores aéreos (ALS) y los segundos para los registros procedentes de sensores terrestres (TLS).

A continuación, como aspecto de singular importancia, se aborda el tratamiento de los datos láser así como un conjunto de algoritmos para clasificar o segmentar la información registrada en función del tipo de objeto medido. Seguidamente, como una aplicación de interés para su empleo en Cartografía se detallará un algoritmo para extraer información vectorial lineal a partir de los datos puntuales ya clasificados.

Como se ha revisado en capítulos anteriores, los datos láser pueden verse notablemente mejorados si se añade información multiespectral procedente de otros sensores, como sensores ópticos o cámaras. Para ello se mostrará cómo integrar imágenes multiespectrales con o sin georreferenciación. Si no están georreferenciadas se expondrá un método para calcular la georreferenciación a partir de los datos geométricos obtenidos. Con los datos geométricos y radiométricos, una aplicación inmediata podría ser la extracción de la ortofotografía, producto cartográfico esencial hoy en día. Por último, como complemento a los algoritmos propuestos, se detallarán un conjunto de herramientas para mostrar y editar la información en una herramienta informática, que ofrece la posibilidad de modificaciones asistidas por un usuario.

Todas las herramientas y algoritmos han sido desarrollados en lenguaje C++ para Windows, tanto 32 bits como 64 bits. Para poder realizar las pruebas pertinentes de visualización, velocidad y extracción de resultados, todas las herramientas han sido integradas en una librería dinámica (DLL) en el software MDTopX de Digi21, propiedad intelectual del autor de esta tesis. En el capítulo 6, se detalla el desarrollo y su integración.

### 5.1.2. Procesos previos

Como todo proceso que utiliza datos digitales, la primera tarea debería centrarse en la estructura de almacenamiento de la información. En este sentido y como se comentó en el apartado 4.1, el formato de archivos LAS propuesto por la ISPRS se está convirtiendo en un estándar tanto para almacenar datos procedentes de ALS como TLS, gracias a la posibilidad de incluir todas las características registradas por los sensores y a su limitado espacio en disco o memoria. No obstante, algunas aplicaciones o sensores terrestres todavía no han incluido este formato y suelen utilizar formatos ASCII, lentos y voluminosos, para transferir (exportar/importar) datos. Por otro lado, sobre todo en datos de objeto cercano, se utiliza el formato STL para transferir información en formato de triangulación, es decir, cuando ya se han generado las relaciones de vecindad pertinentes en la nube de puntos. Por ello, para poder utilizar los datos láser y exportar los resultados obtenidos, se han tenido que desarrollar las funciones necesarias para leer y escribir tanto el formato LAS como en formato STL.

## 5.2. Triangulación rápida en 2D

### 5.2.1. Introducción

El resultado de la medida utilizando láser es una nube de puntos. Esta nube es altamente densa pero aun así, representa información discreta del objeto. Si se desea información en cualquier punto del espacio, se debe transformar esta información discreta a información de tipo continuo. Este cálculo se puede realizar, básicamente, de dos formas: interpolar una estructura continua predefinida o relacionar los datos discretos para formar una estructura continua de información.

La primera solución ofrece como resultado una rejilla cuyos vértices no son los datos directamente medidos, por lo que implicará una pérdida de detalle pero también una reducción del error, pues sus cotas provendrán de medias ponderadas. Se suelen utilizar rejillas regulares cuyas celdas normalmente tienen forma cuadrada. Su sencillez de manejo y rapidez de cálculo la convierten en una de las soluciones más adecuadas para obtener una superficie continua.

La segunda solución implica aplicar un algoritmo que relacione un punto con los puntos de su entorno generando superficies como unión de estas relaciones. Es decir, la solución se basa en resolver problemas de vecindad. Normalmente, la figura matemática utilizada es el triángulo, por lo que la malla resultante se denomina triangulación. Esta triangulación debería tener unas condiciones mínimas que le otorguen cierto rigor, por ejemplo, que no se solape ningún triángulo, que no se genere ningún hueco interior o que ningún punto quede sin ser relacionado.

Para el análisis del objeto medido, la decisión del tipo de superficie generada es sumamente importante. Se deben realizar múltiples cálculos para segmentar la información recogida por el sensor y por ello se considera más adecuado la segunda solución. Su construcción es más laboriosa pero también más precisa y contempla todos los puntos medidos por lo que todos ellos podrán ser comprobados y clasificados en función de decisiones posteriores. De hecho, muchos de los algoritmos aquí expuestos se basan en una triangulación de los puntos medidos. Es por ello, que se considera fundamental tener un algoritmo que calcule las relaciones de vecindad de manera eficiente en el menor tiempo posible.

Por tanto, la exposición de las herramientas planteadas comenzará por un algoritmo de cálculo rápido de triangulación.



### 5.2.2. Algoritmos de triangulación

Existen diversos algoritmos que permiten calcular las relaciones de vecindad entre puntos, sin embargo, no todos cumplen las condiciones mínimas. Se debería utilizar un algoritmo cuya rigurosidad en el planteamiento permitiera cumplir estrictamente estas condiciones. Uno de los algoritmos más conocidos y utilizado por las herramientas informáticas es la triangulación de Delaunay. Aparte de las condiciones mínimas reseñadas, tiene otras no menos importantes como que se generará la misma triangulación independientemente del orden de puntos o punto de comienzo del cálculo, que los triángulos serán lo más equiláteros posibles, etc. Sin embargo, el coste computacional en el cálculo de la triangulación de Delaunay es alto, produciéndose relaciones logarítmicas entre el tiempo empleado para el cálculo y el número de puntos.

A continuación, se exponen otros algoritmos conocidos para el cálculo de las relaciones de vecindad.

#### 5.2.2.1. Triangulación mediante diagonales

Este algoritmo se utiliza en la triangulación de polígonos simples. Se basa en minimizar la longitud total de los ejes de la triangulación por medio de una búsqueda iterativa de las diagonales internas más cortas en cada caso. En esta búsqueda, se debe comprobar que no existe intersección entre las diagonales, por lo que puede implicar tener que considerar todas las diagonales del polígono. Precisa de un gran matriz con las distancias y los resultados obtenidos no resultan del todo satisfactorios.

#### 5.2.2.2. Triangulación de Garey

Este algoritmo también se utiliza para polígonos simples y se basa en una descomposición de estos en polígonos monótonos para triangularlos. Asume que en la descomposición no habrá dos vértices de un polígono con la misma coordenada Y. Al igual que en el caso anterior, es lento y precisa una gran cantidad de memoria.

#### 5.2.2.3. Triangulación radial

Este algoritmo, propuesto por Mirante y Weingarten en 1982, se basa en la construcción de una triangulación a partir de la unión de un punto central a un conjunto de puntos alrededor de una forma radial, como muestra la figura 212. El proceso se repite para cada punto, formando una figura convexa donde se van eligiendo aquellos triángulos cuyos ángulos no sean inferiores a un determinado valor. Este algoritmo produce triángulos no deseados y se debe realizar un análisis de los cuadriláteros generados para elegir la mejor diagonal de acuerdo a un criterio de distancia.

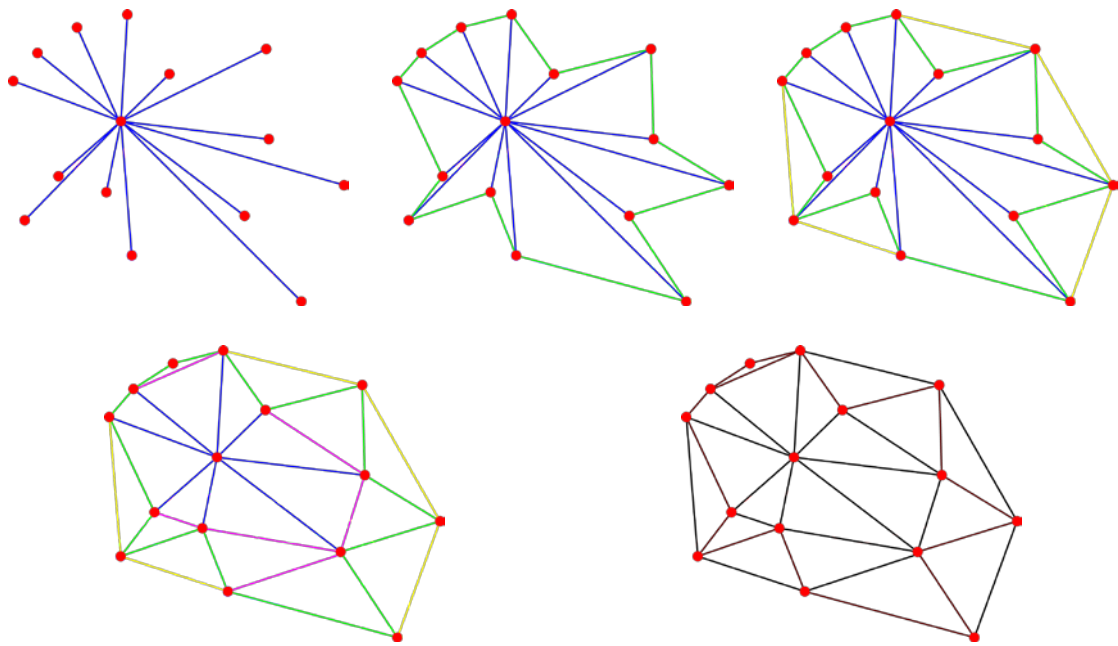


Figura 212: Procedimiento de triangulación radial.

#### 5.2.2.4. Triangulación de Delaunay

Este algoritmo fue ideado por Delaunay en 1934 y se basa en el cálculo de triángulos que están inscritos en circunferencias donde no se encuentra ningún punto en su interior. De esta forma, se evitan los ángulos agudos de los triángulos, ya que las circunferencias tendrán un tamaño reducido y los triángulos inscritos en ellas se aproximarán a la forma equilátera. La triangulación generada es única, independientemente del punto de comienzo del cálculo o de la ordenación del conjunto de puntos. Además, la figura total generada es convexa (*convex hull*), no encontrándose ningún solape de triángulos, ni zonas vacías en el interior o puntos sin conexión.

Está íntimamente relacionada con el diagrama de Voronoi y ha sido el algoritmo mayoritariamente utilizado en geometría computacional desde que aparecieron los primeros algoritmos en la década de 1970 por parte de Fredereick o Shamos y Hoey.

Este algoritmo también tiene su versión tridimensional donde en vez de triángulos se calculan tetraedros y en vez de utilizar circunferencias se utilizan esferas. Esta modificación será explicada en detalle en el apartado 5.3.

Existe una gran variedad de algoritmos que permiten construir este tipo de triangulación a partir de un conjunto de puntos. A continuación, se citan los más utilizados:

- Algoritmos incrementales: Se basan en la introducción de puntos que no pertenecen a la triangulación buscando los triángulos que afectan. Estos triángulos serán aquellos en los que el punto se encuentra sobre la circunferencia

donde estén inscritos. El proceso de construcción de la triangulación es sencillo, puesto que se comienza con puntos exteriores a la nube de puntos generando triángulos que incluyan toda la nube. A continuación, se introducen los puntos modificando secuencialmente los triángulos existentes. La limitación de estos algoritmos está en la búsqueda de los triángulos afectados, por lo que se suelen utilizar estructuras de ordenación de los triángulos basados en *quadtrees* u *octrees*. Asimismo, si los datos están en memoria se precisa de una estructura de datos que puede ocupar mucho espacio. Para paliar este problema, se han propuesto soluciones con un cierto orden espacial lógico. Por otro lado, este algoritmo puede utilizarse igualmente en 3D. Como se explicará posteriormente, en la presente tesis se desarrolla un algoritmo basado en esta técnica, modificado para poder triangular millones de puntos en el menor tiempo posible. Igualmente, se propone una solución en 3D para generar los tetraedros con idéntico planteamiento.

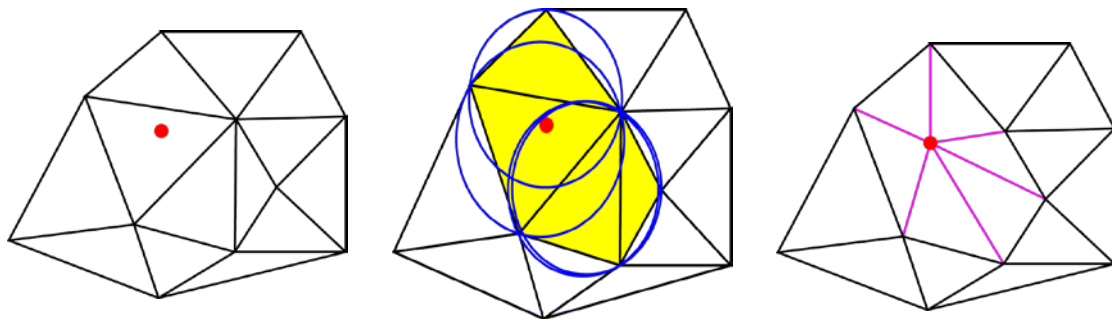


Figura 213: Inserción incremental de un punto en una triangulación.

- Algoritmos paso a paso: Estos algoritmos están basados en la construcción de la red a partir de los lados exteriores de ésta. Se elige como comienzo el lado exterior más corto y se van seleccionando los vecinos comprobando que dentro de la circunferencia generada no se encuentre ningún otro punto. Los lados elegidos se incorporan a una lista para continuar con la triangulación de una manera recursiva.
- Algoritmos de cambio de diagonales: Estos algoritmos se basan en la construcción de la triangulación en dos pasos. Un primer paso que genera una triangulación arbitraria con criterios únicamente de proximidad entre puntos. Y un segundo paso donde se irán modificando las diagonales de aquellos cuadriláteros que no cumplan con la condición de la circunferencia en la que está inscrito cada triángulo.
- Algoritmos de barrido: Estos algoritmos barren la nube uniando los puntos mediante una línea. Aquellos puntos que quedan detrás de la línea son triangulados, generando nuevos triángulos y una nueva línea, repitiendo el proceso. Su formulación inicial buscaba los polígonos de Voronoi.

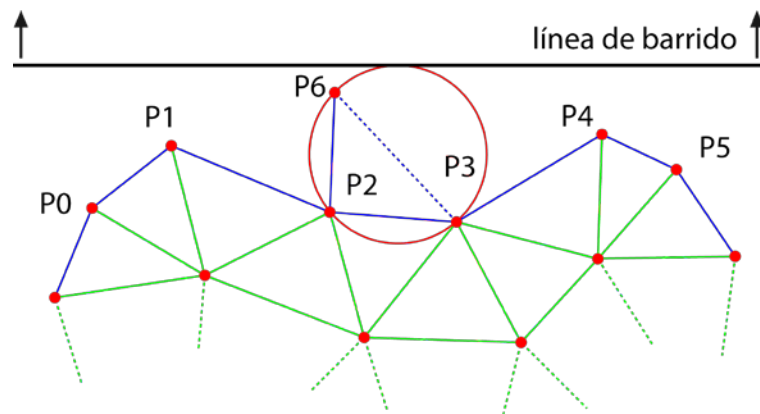


Figura 214: Algoritmo de barrido.

- Algoritmos “divide y vencerás”: Estos algoritmos se basan en la división de la nube inicial en partes, triangulando cada una de ellas. Posteriormente, emplean un proceso de unión de las partes generadas. Obviamente, el principal problema está en la unión de las diferentes partes, acelerando el proceso de triangulación.

### 5.2.3. Algoritmos para el tratamiento de grandes conjuntos de datos

Desde diferentes ámbitos de la Ciencia se han desarrollado dispositivos de captura de datos que generan enormes cantidades de datos. Este es el caso de la cartografía, pero existen otros ejemplos relacionados con la medicina (tomografía, resonancias), la ingeniería gráfica (elementos finitos), etc. En ocasiones y a pesar de la capacidad de los ordenadores, estos conjuntos de datos sobrepasan la capacidad operativa de los algoritmos que los tratan, por lo que se han propuesto diferentes técnicas para manejar esta información de una forma eficiente. En general, se basan en una limitada utilización de la memoria y en un aumento de la velocidad de proceso (Isenburg, et al., 2006). A continuación, se exponen algunas de estas técnicas.

#### 5.2.3.1. Algoritmos “divide y vencerás”

Las ventajas de estos algoritmos residen en la limitada cantidad de información manejada en cada momento. Sin embargo, en determinadas situaciones no es sencillo subdividir la información. Además, pueden plantear problemas en las zonas de unión de dichas subdivisiones. Por ejemplo, en algoritmos de generación de superficies como puede ser la triangulación de Delaunay, presenta un problema complejo para generar las uniones.

Por otro lado, es lógico pensar que la información esté particionada y así se presenta en la mayoría de los casos, por lo que existen herramientas que unen triangulaciones de zonas aledañas. De hecho, para la gestión de trabajos registrados con LiDAR se plantea la utilización de proyectos donde estén referenciados todos los archivos en los que se ha dividido la información y tratar cada uno de ellos de forma individual.

#### 5.2.3.2. Algoritmos basados en la memoria caché

Este tipo de algoritmos se basan en la utilización de la memoria caché del ordenador. Incluso algunos de ellos están optimizados para determinadas arquitecturas. Su técnica se centra en el aumento de velocidad en las transacciones de datos.

#### 5.2.3.3. Algoritmos basados en memorias externas

Estos algoritmos se basan en el almacenamiento en disco de conjuntos de datos que no tienen cabida en la memoria interna de los equipos. Además ofrecen una gestión optimizada del acceso a disco con el objetivo de aumentar la velocidad en las transacciones de datos. Para alcanzar estos objetivos, se utilizan complejas estructuras de datos. Tanto este tipo de algoritmos como el anterior han sido desarrollados de manera teórica pero no han sido muy utilizados en la práctica. Una de las excepciones es la solución planteada por Isenburg que propone la triangulación ilimitada de puntos utilizando para ello discos duros en estado sólido o SSD, cuya velocidad es diez veces más rápidos que un disco duro normal, acercándose a las transacciones propias de la memoria RAM (Isenburg, et al., 2006).

#### 5.2.3.4. Algoritmos secuenciales

Estos algoritmos se basan en la utilización secuencial de los datos. Estos podrán estar almacenados en disco o en memoria pero sólo se accede a los mismos en un limitado número de veces, normalmente para fijar ciertos valores de cálculo: límites del conjunto de datos, índices, etc. Estos algoritmos no utilizan ninguna estructura de datos y si los datos están en disco, requieren poca memoria para la gestión de la información.

#### 5.2.4. Algoritmo desarrollado

El tratamiento de la información procedente de sensores de barrido láser tiene el inconveniente de la cantidad de puntos registrados. La visualización, utilización, filtrado, segmentación y clasificación de estos puntos pueden realizarse mediante la generación de superficies, ya que se podrán extraer ciertas características y relaciones existentes entre ellos. Por otro lado, la generación de estas superficies o modelado espacial de los datos puede realizarse mediante una rejilla regular interpolada o mediante una triangulación irregular. La rejilla regular implica una pérdida de detalle en los datos, por no utilizarse los originalmente medidos. La triangulación irregular implica la utilización de un algoritmo que genere los triángulos, por ejemplo, basado en la triangulación de Delaunay.

Desde este documento, se propone utilizar una triangulación irregular basada en la triangulación de Delaunay por sus propiedades de precisión, unicidad, robustez y rapidez. Sin embargo, debido al volumen de información se debe emplear un algoritmo que no aumente exponencialmente el tiempo de cálculo en función del número de puntos triangulados ni que precise de grandes cantidades de memoria física. Por ello, se propone

un algoritmo basado en la introducción de los puntos de una forma incremental o secuencial (Isenburg, et al., 2006). Sin embargo, los resultados obtenidos son almacenados en *quadrees*, de tal forma, que se puede liberar la memoria según se vayan completando cada zona. Este almacenamiento difiere al presentado por Isenburg, ya que no requiere tener que comprobar qué triángulos pueden ser almacenados y cuáles no, cuando se alcanza un punto etiquetado como final. Tampoco se requiere la utilización de discos duros en estado sólido, puesto que el objetivo no es triangular un número ilimitado de puntos.

Por tanto, el algoritmo presentado a continuación podría ser clasificado como secuencial, con un planteamiento ligeramente basado en la teoría de “divide y vencerás”. La característica particular de este algoritmo es la introducción de un punto con la marca de “último de la zona” por lo que, triangulado éste, todos los triángulos de esta zona podrán ser almacenados y liberados de la memoria. Estas zonas serán los diferentes *quadrees* en los que se subdivide previamente la información, por lo que no se tiene que triangular ni mantener toda la información en memoria, si no que se puede subdividir en zonas tan pequeñas como se desee. Este planteamiento también puede ser aplicado en 3D como se expone en el apartado 5.3.

Además, el desarrollo del algoritmo se ha realizado teniendo en cuenta que se pueda dividir en varios procesos o “hilos de ejecución”. Esta característica es importante y no exenta de dificultad. Hoy en día, los ordenadores disponen de varios procesadores o varios núcleos y estos no serán empleados simultáneamente por una misma aplicación salvo que se utilicen “hilos de ejecución”. Sin embargo, poder dividir el cálculo de un algoritmo en varios procesos ejecutándose simultáneamente implica un orden de trabajo y una estructuración de la información exquisita, puesto que varios procesos accederán y modificarán información simultáneamente y no podrán “solaparse” entre ellos. Esta manera de programar podría permitir en un futuro aplicar el algoritmo en ordenadores en paralelo, como es la tendencia actual en el tratamiento de la información.

Las pruebas realizadas han sido llevadas a cabo utilizando un vuelo LiDAR formado por archivos en formato LAS. Cada archivo contenía entre medio millón y millón y medio de puntos. Las características del vuelo y la zona elegida se encuentran detalladas en el apartado 7.1.1. Estas pruebas han sido ejecutadas en un ordenador con procesador Intel i7 con sistema operativo de 64 bits, seis gigabytes de RAM y ocho núcleos. Se han procesado diferentes conjuntos de datos para determinar la relación existente entre el número de puntos procesados y el tiempo empleado. Con ello, se podrá analizar si el algoritmo tiene una curva de respuesta logarítmica o lineal.

Al contrario que la solución propuesta por Isenburg, que se centra en la generación y almacenamiento de la triangulación, el algoritmo aquí expuesto se integra dentro de un sistema, por lo que implica la visualización de los datos y la salida de los resultados en un interfaz amigable, donde el usuario podrá seleccionar la vista o editar la información según su criterio. Esto condicionará la optimización del algoritmo, que implicará mayores requerimientos del ordenador respecto a memoria, velocidad de cálculo o uso de la tarjeta gráfica. Sin embargo, también se propone una solución que lee los datos desde disco,



calcula y almacena los resultados, sin tener que visualizar los resultados, por lo que la velocidad de proceso es mayor.

Respecto a la tarjeta gráfica y visualización de los datos, también se han tenido que plantear soluciones adecuadas puesto que la cantidad de información manejada es importante. En este sentido, se han utilizado igualmente *quadtrees* y se ha programado utilizando librerías OpenGL que permiten una comunicación directa con la tarjeta de video sin la gestión del sistema operativo (Shreiner, et al., 2006). Esto aumenta la velocidad de visualización y el proceso de los datos, proporcionando un interfaz de visualización basado en 3D (Cozzi & Ring, 2011).

#### 5.2.4.1. Tratamiento previo de la información

Como se ha comentado anteriormente, el algoritmo se integra dentro de un sistema donde se ofrecerán más herramientas, entre las que se encuentran las de edición, visualización, entrada/salida a disco, etc. Por ello, la fuente de datos para calcular la triangulación será un archivo de puntos almacenada en la memoria del ordenador. En principio, este archivo está desordenado, es decir, no se utiliza para su almacenamiento ninguna estructura de ordenación como pueden ser los ya mencionados *quadtrees*.

Por tanto, el cálculo de la triangulación se realiza con una inserción secuencial y aleatoria de los puntos, sin dividir la fuente de datos. Obviamente, este aspecto condicionará la manera de calcular la triangulación. No obstante, si el conjunto de datos fuera demasiado grande como para ser almacenado en memoria, se ha desarrollado una variante que utiliza los datos directamente del disco, reduciendo ampliamente el uso de ésta. Por otro lado, según la arquitectura de los ordenadores y sistemas operativos actuales, las limitaciones de memoria ya no son tan importantes. Es decir, en sistemas 64 bits no existe la limitación de cuatro gigabytes existente en sistemas 32 bits. No obstante, se dan ambas soluciones, para sistemas 32 bits y 64 bits.

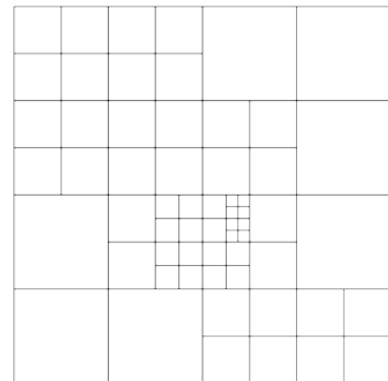


Figura 215: División del espacio (2D) en *quadtrees*.

A pesar de la aleatoriedad de los datos, normalmente estos presentan un ordenamiento implícito. Por ejemplo, las nubes de puntos registradas con láser provienen de un barrido realizado por el sensor, por lo que sus puntos mayoritariamente están ordenados. No obstante, se van a realizar pruebas utilizando la colocación original del archivo o eligiendo los puntos de forma aleatoria en el archivo para medir los tiempos de proceso.

Teniendo en cuenta este desorden aparente, se precisa de un artificio para no tener toda la información ni todas las soluciones calculadas (es decir, triángulos) en memoria. Para ello, se realizará un barrido por la nube de puntos buscando cuál será el último punto de cada *quadtree* de salida. Es decir, los triángulos generados serán almacenados en *quadtrees*

según sus dimensiones y, a priori, se podrá saber cuándo una zona no será nuevamente alterada. Según esto, se tendrá un dato objetivo para poder liberar dicha zona de memoria y almacenarla en disco para su tratamiento posterior. En este barrido inicial de la nube de puntos, se establecerán otros parámetros útiles para la triangulación como son las máximas y las mínimas espaciales y el primer punto de cada *quadtree*, necesario para el cálculo posterior.

Como se ha comentado, se generarán *quadtrees* que alberguen los triángulos calculados. La cantidad de puntos que puede tener cada *quadtree* es un parámetro a determinar y se realizarán pruebas para establecer cuál es el valor óptimo en función del tiempo empleado por el algoritmo. Por ello, para determinar cuántas zonas o celdas debe haber, se realiza un barrido a priori contando el número de puntos que cae en cada zona. Si alguna de las zonas supera una cantidad de puntos impuesta como umbral se procede a su división en cuatro celdas iguales (denominadas hijas), reordenando los puntos que contenía (figura 215).

Por otro lado, la condición para que un triángulo pertenezca a un determinado *quadtree* se realiza considerando la dimensión de la circunferencia en la cual está inscrito, por lo que se podrá asegurar que si no va a haber ningún punto nuevo en esta zona, ésta permanecerá inalterada por lo que se puede almacenar y prescindir de ella en el futuro.

#### 5.2.4.2. Cálculo de los triángulos

Una vez que se han establecido los *quadtrees*, se han calculado las dimensiones de la nube de puntos origen y se han etiquetado los puntos que iniciarán y finalizarán cada zona, se procede a la inclusión de los puntos para ser triangulados.

Este proceso de triangulación se divide en dos fases. Una primera, donde se triangula un punto por cada zona, de tal forma que se genera un objeto con triángulos que cubrirán todo el espacio a triangular. Estos puntos de cada zona también fueron etiquetados (puntos iniciales) en el barrido a priori que se dio a la nube de puntos. La segunda fase conllevará la inclusión del resto de puntos modificando los triángulos iniciales.

Como se ha comentado, el proceso de triangulación empleado por el algoritmo se podría englobar dentro de los denominados incrementales. Obviamente, utiliza la triangulación de Delaunay, aprovechando todas las ventajas que ésta tiene.

Por ello, el proceso de triangulación de un punto implica el cálculo de todos los triángulos que afecta, es decir, la determinación de todas las circunferencias en las que están inscritos los triángulos existentes que incluyan el punto. Esta búsqueda puede consumir demasiado tiempo sin un orden preestablecido. Sin embargo, en el barrido que se planteó a priori de la triangulación se estableció para cada punto a qué zona pertenecía por lo que se tiene un punto de comienzo para la búsqueda. Se comenzará a buscar entre los triángulos de dicha zona y se irá rellenando una lista con los triángulos “afectados” y los triángulos “posibles”. Si un triángulo es afectado porque el punto se encuentra dentro de su

circunferencia se añade a la lista de “afectados” y sus tres triángulos vecinos se añaden a la lista de triángulos “posibles”. A continuación, se procederá con el siguiente triángulo en la lista de “posibles” actuando de la misma manera. El proceso de búsqueda finalizará cuando se vacíe la lista de triángulos “posibles”.

El proceso de cálculo de los nuevos triángulos también es un proceso rápido porque será el resultado de unir el punto nuevo introducido con los lados exteriores del polígono formado por los triángulos afectados. Cada triángulo generado se almacenará en la zona que le corresponda, teniendo en cuenta que las dimensiones de la circunferencia en la que está inscrito deberán estar completamente dentro de los límites de dicha zona. De esta forma, la triangulación se va transformando, sustituyendo unos triángulos por otros de menores dimensiones dando mayor detalle a cada una de las zonas. La estructura de cada triángulo incluirá referencias a cada vértice y a los triángulos vecinos. Cada vez que se introduce un triángulo en una zona se almacena como “triángulo actual” facilitando la búsqueda posterior que precisa la introducción de un nuevo punto. Esto es debido a que, normalmente, las nubes de puntos siguen un determinado orden.

Lógicamente, según se van introduciendo puntos a la triangulación se van generando nuevos triángulos que van mermando la cantidad de memoria. En este momento, es cuando cobran importancia los puntos etiquetados como finales de cada zona. Una vez que se triangula uno de estos puntos, se podrá asegurar que la zona que lo incluye (y sus zonas hijas) no van a ser modificadas en procesos posteriores por lo que pueden ser almacenadas y liberadas de memoria, manteniendo un consumo de memoria bajo. Además, incluye más ventajas porque estos triángulos almacenados no se utilizarán para realizar nuevas búsquedas de triángulos afectados, manteniendo un consumo computacional constante, prácticamente lineal.

Por último y para mejorar la velocidad de proceso, se ha introducido la utilización de hilos de ejecución. En principio, sólo serán necesarios dos hilos de ejecución: un hilo de ejecución que va insertando puntos nuevos y calculando los nuevos triángulos; y un segundo hilo de ejecución que será el encargado de realizar la grabación en disco y liberación de la memoria de aquellas zonas que ya no serán utilizadas porque se insertó su punto etiquetado como final. Estos dos hilos de ejecución deben operar con sumo cuidado para que el primero no intente utilizar los triángulos que el segundo está grabando y liberando de la memoria. Sin embargo, la velocidad de proceso aumenta al doble.

#### 5.2.4.3. Construcción del objeto triangulación

El proceso de almacenamiento de cada triángulo se realiza a través de referencias a los puntos elegidos como vértices. Este almacenamiento no tiene un orden específico para utilizarse posteriormente en su visualización. A continuación, cuando todos los triángulos sean almacenados, serán ordenados y transformados en el objeto triangulación, utilizado en procesos posteriores, como puede ser su visualización o la clasificación y segmentación de los puntos en función de las relaciones existentes entre puntos vecinos, es decir, que son vértices del mismo triángulo.

El diagrama de flujo del algoritmo se detalla en el apartado 6.1.2.

#### 5.2.4.4. Resultados obtenidos

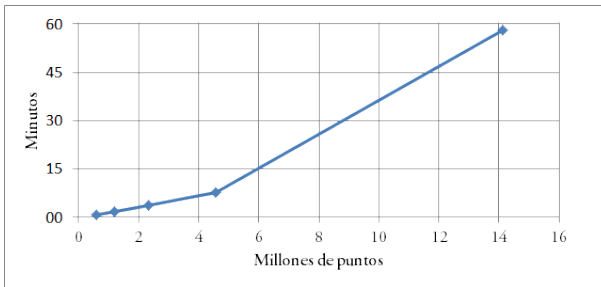
Se han realizado procesos experimentales con ficheros de puntos procedentes de un vuelo LiDAR de una zona rústica (más detalles de la zona en el apartado 7.1.1). Cada archivo contiene entre medio millón y millón y medio de puntos. Se han realizado pruebas con diferentes volúmenes de información para comprobar la dependencia del algoritmo respecto del número de puntos, es decir, si se obtiene una curva logarítmica o si la relación es lineal.

Las pruebas han sido realizadas con un ordenador portátil con procesador Intel i7, seis gigabytes de RAM y ocho núcleos. Tanto el sistema operativo como la aplicación operan a 64 bits.

En la primera aproximación del algoritmo se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 13: Resultados obtenidos en la primera aproximación del algoritmo de triangulación 2D.

Ficheros	Puntos	Tiempo	Ratio
1	572711	00:50	0.69
2	1188418	01:48	0.66
4	2344236	03:44	0.63
8	4578779	07:50	0.58
16	14142977	58:13	0.24



El gráfico muestra una serie de puntos conectados por una línea azul. El eje horizontal (X) está etiquetado como 'Millones de puntos' y va de 0 a 16. El eje vertical (Y) está etiquetado como 'Minutos' y va de 0 a 60. Los puntos de datos corresponden a los valores de la Tabla 13: (0.57, 0.5), (1.19, 1.48), (2.34, 3.44), (4.58, 7.5), (14.14, 58.13). La línea muestra un crecimiento casi lineal.

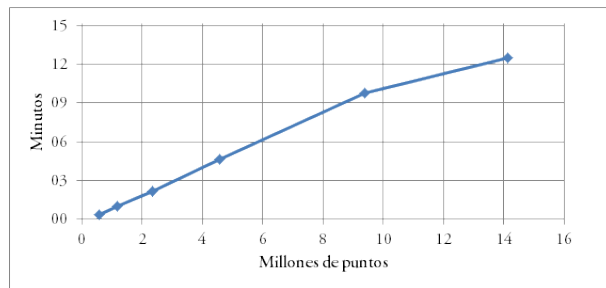
Como se puede observar la relación entre el tiempo empleado y el número de puntos va aumentando progresivamente. Hay que considerar que en estos tiempos están incluidos los procesos de relectura de la triangulación almacenada y su conversión en una estructura útil para su visualización y edición.

No obstante, se ha tratado de mejorar los resultados obtenidos mediante un diseño del algoritmo que permita la introducción de hilos de ejecución. Esta forma de programar es ciertamente compleja porque se utilizarán simultáneamente tantos hilos de ejecución como núcleos tenga el ordenador. Al trabajar de forma paralela estos procesos no podrán colisionar en el acceso de escritura de determinadas variables y objetos, por ello, hay que poner énfasis en el cuidado en el diseño del algoritmo.

Esta programación multihilo se ha conseguido en el proceso de triangulación, consiguiendo calcular utilizando dos hilos de ejecución diferentes: uno para calcular la triangulación y otro para almacenar los triángulos concluidos. Según esta nueva aproximación, los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Tabla 14: Resultados obtenidos en la segunda aproximación del algoritmo de triangulación 2D.

Ficheros	Puntos	Tiempo	Ratio
1	572711	00:22	1.56
2	1188418	01:01	1.17
4	2344236	02:10	1.08
8	4578779	04:40	0.98
8	9392445	09:46	0.96
16	14142977	12:31	1.13

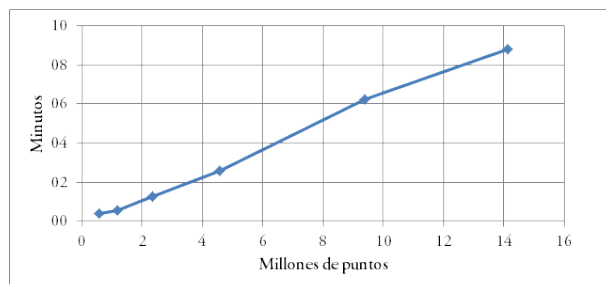


A la vista de los resultados, se puede concluir que los ratios han aumentado, en algunos casos, hasta cuatro veces. Se han procesado un millón de puntos por minuto, aproximadamente. Otro detalle importante es la relación entre puntos triangulados y el tiempo empleado, que se asemeja a una relación lineal, mejor que en el caso anterior.

Sin embargo, todavía se podían mejorar los resultados si se introducían hilos de ejecución en la lectura de los triángulos almacenados en disco e introduciendo un hilo en cada una de las zonas en las que se dividían la triangulación. Los resultados han sido los siguientes:

Tabla 15: Resultados obtenidos en la tercera aproximación del algoritmo de triangulación 2D.

Ficheros	Puntos	Tiempo	Ratio
1	572711	00:24	1.43
2	1188418	00:34	2.10
4	2344236	01:17	1.83
8	4578779	02:34	1.78
8	9392445	06:14	1.51
16	14142977	08:49	1.60



Los resultados han vuelto a mejorar de manera significativa, con una velocidad media de 1.71 millones de puntos triangulados por minuto.

Por tanto, en este momento se dispone de una herramienta de gran interés práctico para la toma de decisiones en modelado de datos, haciendo posibles algunos de los algoritmos y herramientas que posteriormente se describen, cuyos cálculos se basan en las relaciones obtenidas mediante una triangulación.

## 5.3. Tetraedrización

### 5.3.1. Introducción

A diferencia de lo que ocurre con la fotogrametría aérea, el registro de objetos tridimensionales a corta distancia supone el conocimiento de puntos que no pueden suponerse apoyados sobre el mismo plano o a una corta distancia relativa de este. La diferencia entre la profundidad del objeto y la distancia al centro de proyección del sensor no es tan notable como en el registro de la Tierra desde plataformas aerotransportadas.

Entre otros problemas, esta profundidad producirá zonas de sombra que provocará que se deban realizar tomas desde diferentes puntos, que generarán geometrías convergentes, situando puntos en cualquier zona del espacio tridimensional. Este problema no ocurre cuando se registra desde el aire porque los puntos se suponen apoyados sobre un plano y se pueden realizar cálculos de relaciones entre ellos sobre el mismo. Estas relaciones suelen representarse mediante triangulaciones, como puede ser la conocida triangulación de Delaunay, ya vista en el capítulo anterior. Debido a su carácter bidimensional y por contener la cota como atributo en cada punto, estos modelos se denominan 2.5D.

Sin embargo y debido a la distribución en el espacio tridimensional de los puntos, la triangulación de Delaunay no puede utilizarse libremente cuando se registran geoméricamente objetos tomados desde distancias cortas. Por ello, se recurre a otro tipo de algoritmos que generen relaciones similares a las obtenidas cuando los puntos están distribuidos en un plano.

Existen soluciones intermedias, útiles para la definición geométrica de edificaciones que sería la concatenación de varias triangulaciones de Delaunay sobre los diferentes planos generados por las fachadas del edificio. No obstante, esta solución debe ser controlada por el usuario porque debe ser éste el que elija qué puntos corresponden a cada plano y qué planos son los ideales para la reconstrucción tridimensional. A veces, esta división del trabajo no es trivial. Incluso dentro de una misma fachada, se dan elementos que no se pueden representar mediante una triangulación que sólo contempla relaciones espaciales entre puntos en el plano.

Por ello, en un tratamiento generalista del problema no se puede recurrir a la búsqueda de relaciones de vecindad en el plano, si no que este análisis debe realizarse en el espacio tridimensional. Ello conduce al tratamiento de tetraedrizaciones que contemplarían las relaciones de vecindad en el espacio tridimensional entre los puntos (Cavendish, et al., 1985).

El objetivo de este tipo de algoritmos es el modelado del objeto de la forma más realista posible. En un siguiente paso y dependiendo del objeto registrado, se podrían calcular por aproximación y utilizar objetos tridimensionales conocidos como esferas, cilindros o prismas. Esta posibilidad no suele ser habitual en el registro de entidades de



interés patrimonial debido a la irregularidad de las formas que presentan. Sin embargo, sí suelen ser de utilidad en el registro de elementos de carácter industrial como plantas eléctricas, gasistas o petrolíferas, o algunos arquitectónicos como columnas o bóvedas.

Es importante reseñar que un buen modelado no implica que sea útil. Es decir, el modelado debe facilitar la fase de documentación, cálculo o análisis del objeto. Por ello, se deberán proporcionar las herramientas o utilidades necesarias. Por ejemplo, el modelado de una pieza de diseño industrial deberá permitir extraer los datos para ser introducidos en las máquinas para su mecanización o construcción. En el caso de objetos de interés patrimonial, deberán permitir calcular planos para su análisis como ortofotos, mapas de pendientes o de curvas de nivel respecto a alguna superficie.

Las herramientas habituales para permitir al usuario un adecuado modelado y extracción posterior de datos suelen incluir la inserción de puntos o líneas definitorias del objeto en zonas como escasa densidad de datos, la eliminación de datos incorrectos o confusos y la extracción de la superficie exterior del objeto registrado. Todas estas operaciones serán tratadas a continuación.

### 5.3.2. Algoritmo de modelado tridimensional

Como se vio en el capítulo anterior, las técnicas de modelado se resumen en la búsqueda de relaciones coherentes de vecindad entre los datos registrados. Estas técnicas de modelado tendrán como resultado una superficie continua representativa del objeto que se ha medido. Se analizaron varias técnicas concluyendo que la triangulación de Delaunay ofrece mejores resultados a pesar de su coste computacional.

El problema actual es el modelado tridimensional de un conjunto de datos distribuidos de forma aleatoria por todo el espacio tridimensional. Por tanto, no es de utilidad las técnicas basadas en triangulación y la búsqueda de las relaciones de vecindad tendrá que hacerse teniendo en cuenta las tres coordenadas XYZ de los puntos.

Sin embargo, la solución propuesta por Delaunay puede extenderse de las dos dimensiones a las tres dimensiones y donde se hacen referencias a elementos planos pueden sustituirse por elementos volumétricos. Es decir, el volumen generado será resultado de la concatenación de elementos volumétricos simples, por ejemplo, tetraedros. Los tetraedros están formados por cuatro vértices, por lo que habrá que encontrar un algoritmo que vaya relacionando conjuntos de cuatro vértices que formen tetraedros lo más pequeños posibles y cuyas caras sean triángulos lo más equiláteros posibles. Este algoritmo también deberá tener las propiedades que Delaunay formuló para las dos dimensiones como es que no existan huecos interiores ni que existan solapes entre los diferentes tetraedros. Para ello y como similitud a la propuesta bidimensional, se tomará como premisa que la esfera donde esté inscrito cada tetraedro no contenga ningún otro punto del conjunto inicial.

Dentro de esta investigación se propone un algoritmo de generación de una tetraedrización rápida basándose en las experiencias obtenidas en 2D. El resultado es un modelo que relaciona todos los puntos registrados y que permite, de una forma sencilla,

obtener la superficie exterior del objeto mediante la extracción de los triángulos externos y cuyos lados no superen una cierta longitud. Como se verá a continuación, esta distancia umbral deberá elegirse en función de la densidad de registro inicial y su valor influirá sobre los detalles que quedarán representados sobre la superficie final.

El diagrama de flujo del algoritmo de tetraedrización se puede consultar en el apartado 6.1.3.

### 5.3.3. Algoritmo para la extracción de la superficie envolvente

Como se ha señalado, tanto para el proceso de modelado como el de edición se propone una infraestructura de datos basada en la generación de tetraedros que relacionan todos los datos registrados. Sin embargo, para una explotación de los datos geométricos, por ejemplo para la generación de ortofotografías, mapas de relieve, curvados o tintas hipsométricas, es necesario algún otro tipo de estructura que muestre únicamente las caras exteriores del objeto. Hay que tener presente que una estructura de datos basada en tetraedros es tridimensional generando relaciones en el interior del objeto, que no suelen ser utilizadas, por lo que se desaprovecha información.

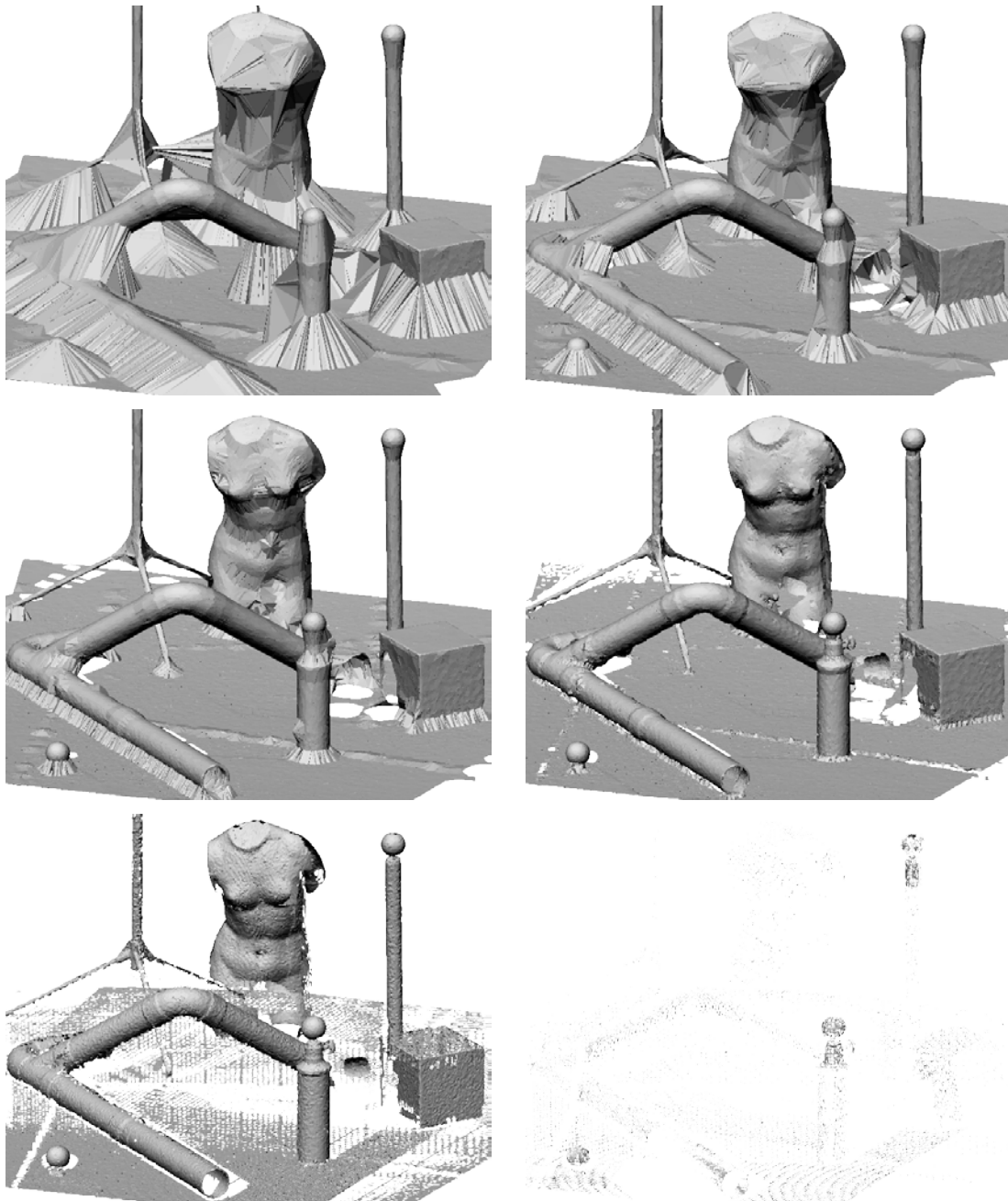
Por otro lado, las ortofotografías precisan de un plano de rectificación, no siendo preciso ni posible un espacio tridimensional. Igualmente, los mapas de representación de relieve como son las curvas de nivel, tintas hipsométricas o sombreados entre otros, utilizan información referente a un plano de referencia, ya sea distancia vertical, pendiente o inclinación.

Por todo ello, se precisa un algoritmo que permita transformar la información generada en el proceso de modelado en algún tipo de estructura seleccionada por el usuario para la representación y explotación de los datos.

A continuación, se muestra un ejemplo de tetraedrización de un archivo que contiene el registro de varios objetos con formas variadas: un maniquí, barras verticales, bolas, un cubo, tuberías y un trípode. Esta diversidad de objetos se ha considerado adecuada para evaluar el funcionamiento del algoritmo de tetraedrización. El registro se realizó desde varias estaciones; aun así, existen zonas de sombra provocadas por la posición de los objetos. La tabla 16 muestra seis visualizaciones diferentes de la misma tetraedrización: De izquierda a derecha y de arriba a abajo, se muestran los triángulos menores de 200 mm, 100 mm, 50 mm, 20 mm, 10 mm y 5 mm.

Como se ha comentado anteriormente, el algoritmo de tetraedrización calculará los tetraedros que permiten relacionar todos los puntos en el espacio 3D. Sin embargo, este cálculo no es selectivo y no tendrá criterio para decidir si dos puntos relacionados mediante un tetraedro también están relacionados en la realidad, es decir, si son contiguos y forman parte de la misma superficie.

Tabla 16: Tetraedrización de un archivo mostrado con diferentes resoluciones.



Una vez se han calculado todas las relaciones, hay que introducir manualmente la distancia máxima que puede tener un lado de tetraedro para ser considerado como válido para el modelado. Sin embargo, ésta no es una decisión sencilla puesto que la densidad de los escáneres no es constante y depende de la lejanía del punto registrado. Por ello, si se elige una distancia “excesiva” no se generará ningún hueco en el modelo pero se estarán relacionando puntos que no son contiguos en la realidad, como ocurre en las dos imágenes superiores. Si se elige una distancia “corta” se pueden generar huecos no deseados en zonas donde la densidad no ha alcanzado este valor, como ocurre en las dos imágenes inferiores. Esta distancia máxima indicará el grado de resolución con la que se desea analizar un modelo. Está claro que si se desea mostrar detalles del objeto se podrán producir huecos en otras zonas que deberán ser cubiertas en proceso de edición a posteriori.

Una vez seleccionada la distancia máxima óptima, se puede proceder a extraer los triángulos “exteriores” de estos tetraedros para poder ser editados con un software genérico de modelos digitales, para calcular ortofotos, curvas de nivel, perfiles, etc.

#### 5.3.4. Edición del modelo

Para poder extraer la superficie exterior del objeto registrado, es imprescindible seleccionar una distancia máxima entre puntos que vayan a ser vecinos, es decir, que definan la superficie. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, esta elección es fundamental en la formación del modelo, pudiendo generar huecos o no representar detalles registrados. Además, existe la limitación de la falta de homogeneidad de los datos registrados, es decir, la densidad no es constante pues ésta depende de la distancia del objeto al sensor. El sensor se puede considerar un foco de radiación, por lo que cada punto tendrá una distancia diferente a éste. La densidad de registro depende del mínimo incremento angular en el movimiento del sensor láser, por lo que aquellas zonas más alejadas tendrán una densidad menor de datos lo que se traduce en una distancia mayor entre puntos consecutivos de registro.

Por otro lado, como en toda medida pueden existir medidas incorrectas o no deseadas generando modelados erróneos. Y, por último, dependiendo del objeto registrado, pueden existir zonas de sombra donde el sensor no ha llegado a medir puntos.

Por todas estas razones, resulta imprescindible la edición del modelado generado, permitiendo la inclusión, eliminación o edición de los puntos registrados. Será necesario incluir puntos de zonas con poca densidad o mal definidas. Se precisarán eliminar puntos registrados erróneamente o sobre elementos no deseados. Y se deberán poder editar los datos registrados en algunas zonas.

Estas necesidades de edición del modelo obligan a una estructuración lógica de los datos que permitan su modificación. Se propone un modelo de datos basado en puntos y tetraedros. Estos, además, estarán organizados en *octrees* lo que agilizará los procesos de búsqueda y edición.

#### 5.3.5. Resultados obtenidos

Se han realizado ensayos con ficheros de puntos procedentes de diferentes proyectos TLS que contenían distribuciones espaciales y cantidades de puntos diferentes. Estos dos parámetros son los condicionantes del número de tetraedros generados que serán entre cinco y siete veces el número de puntos. El objetivo de las pruebas es comprobar la velocidad del algoritmo así como la relación entre el tiempo empleado y el número de puntos del archivo LiDAR.

Las pruebas han sido realizadas con un ordenador portátil con procesador Intel i7, seis gigabytes de RAM y ocho núcleos. Tanto el sistema operativo como la aplicación operan a 64 bits.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos. Se han calculado dos relaciones: Ratio1 como millones de puntos por minuto y Ratio2 como millones de tetraedros por minuto.

Tabla 17: Resultados obtenidos del algoritmo de triangulación 3D.

Proyecto	Puntos	Tiempo	Ratio1	Tetraedros	Ratio2
1	179533	00:58	0.19	1140118	1.18
2	368628	01:58	0.19	2346325	1.19
3	1306534	05:07	0.26	8234253	1.61
4	3160611	12:49	0.25	17887239	1.40
5	3614569	12:04	0.30	21279431	1.76
6	3648344	13:08	0.28	18119580	1.38

Se puede observar que ambas relaciones se mantienen constantes, resultado una relación lineal y no logarítmica que suele ser el principal problema de este tipo de algoritmos. Por tanto, el algoritmo permite realizar la tetraedrización a una velocidad de 250 mil puntos por minuto generando, en ese tiempo, aproximadamente 1.4 millones de tetraedros.

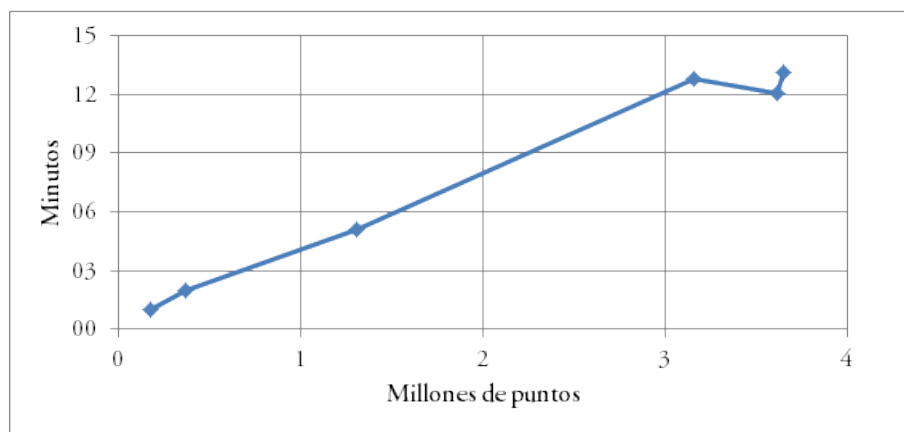


Figura 216: Gráfico con la relación entre cantidad de puntos y tiempo invertido para calcular la tetraedrización de Delaunay.

## 5.4. Clasificación de puntos medidos mediante técnicas láser de barrido

### 5.4.1. Introducción

En capítulos anteriores, se ha mostrado la técnica de medición mediante dispositivos láser de barrido. Como se ha visto, estos dispositivos miden puntos pertenecientes a objetos colocados delante del sensor con una alta densidad de registro. Esta información resulta muy útil para la definición geométrica del objeto medido. Sin embargo, los puntos no siempre pertenecen al objeto de interés puesto que este objeto puede ser difícil de aislar de su entorno más inmediato. Podría ser el caso de la medición de fachadas con todos sus ornamentos o de la medida de la superficie terrestre con los objetos que se encuentran en ella. Sería deseable poder aislar estos objetos adyacentes de un modelado final del objeto de interés.

Por ello, una de las fases más importantes en el tratamiento de la información proveniente de estos sensores es la clasificación de la información en función de su lugar de procedencia. Así, por ejemplo, en la medida de la Tierra con dispositivos aerotransportados podría ser interesante clasificar la información en suelo (terreno desnudo), edificación, vegetación, agua y otros objetos. En el caso de la medida de una fachada arquitectónica podría ser interesante clasificar según los materiales de construcción utilizados, por ejemplo, piedra, pizarra, forja o madera.

Dado que los objetos susceptibles de ser medidos con dispositivos láser cubren un amplio abanico de posibilidades y que la información registrada por el sensor también puede ser variada, se proponen varios tipos de algoritmos que, utilizados de forma individual o conjunta en un proceso ordenado, permitan obtener la información clasificada según las necesidades del usuario final.

Una vez que la información ha sido clasificada, se podrán obtener diferentes tipos de modelos o productos cartográficos. Así por ejemplo, en el caso del registro de la Tierra, el modelo formado por aquellos datos clasificados como “suelo” dará lugar a un Modelo Digital del Terreno (MDT) útil para la generación de mapas de representación del relieve “desnudo”. Si a este modelo se le añade la información clasificada como vegetación o edificación se obtendrá un Modelo Digital de Superficies (MDS), útil para análisis catastrales o cultivos de masas forestales.

En el caso de objetos registrados mediante un sensor estático en trípode, como puede ser un monumento o una fachada de un edificio de interés patrimonial, se podrá generar un modelado con el material utilizado en una fachada para su restauración, o de la madera utilizada en sus ornamentos para su conservación o de la forja utilizada para su sustitución.



Los algoritmos de clasificación propuestos son los siguientes:

- En función de la geometría: Clasificación basada en la posición 3D de un punto respecto de su entorno.
- En función del orden de registro: Clasificación basada en la posición ocupada por un punto por el momento del registro.
- En función de la radiometría: Clasificación basada en las propiedades radiométricas de un punto (intensidad láser o color de un sensor óptico) respecto de su entorno.
- En función de la geometría y radiometría: Clasificación basada en la posición 3D y las propiedades radiométricas de un punto respecto de su entorno.
- Detección de puntos erróneos: Clasificación de aquellos puntos erróneamente medidos o medidos en posiciones no deseadas por el sensor láser.
- Detección automática de puntos pertenecientes a edificaciones: Clasificación de los puntos que pertenecen tanto a las fachadas como a las cubiertas de edificios.
- Detección en función de la morfología: Clasificación de puntos en función de la distribución morfológica del conjunto.
- Superficie mágica: Herramienta que utiliza adecuadamente los algoritmos anteriores para clasificar de forma no asistida un conjunto de puntos.

## 5.4.2. En función de la geometría

### 5.4.2.1. Introducción

A partir de los datos procedentes de un sensor láser de barrido aerotransportado, se propone este algoritmo que pretende clasificar los objetos detectados y medidos por el dispositivo en función de la posición geométrica que tienen respecto de su entorno más cercano.

La clasificación de los datos LiDAR es la tarea primordial en la edición de los datos. Consiste en asignar cierta categoría a un punto en función del elemento al que pertenecen. De esta forma, al finalizar este proceso y estar todos los puntos clasificados, se puede realizar una selección de los elementos que se quieren visualizar, utilizar para el cálculo, eliminar, etc. Si se deseara realizar un curvado de la zona, sólo se seleccionarían los elementos pertenecientes al suelo desnudo. Si se desea realizar una ortofotografía verdadera, se deberán seleccionar aquellos puntos pertenecientes al terreno, edificaciones y vegetación.

La idea principal del algoritmo se basa en la tendencia natural del terreno a cambiar de una forma progresiva. Si esto es así, cualquier cambio brusco en dicha tendencia representaría un objeto sobre la superficie del terreno que habría que clasificar adecuadamente para no ser empleado en cálculos que sólo consideren el terreno desnudo. Asimismo, este algoritmo aprovecha una de las principales ventajas de los datos LiDAR: la gran densidad de información. Esta densidad no es constante, pero prácticamente se mantiene en toda la zona medida y, dependiendo de la altura de vuelo y velocidad de registro, capturaría todos los detalles importantes que se dan en la zona.

Por ello, son varios los parámetros que debería considerar el algoritmo para esta búsqueda de objetos. Estos parámetros deberían dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- ¿Cuál es el entorno del punto?
- ¿Cuál es la diferencia vertical máxima que se puede dar en el terreno?
- Si se está buscando un tipo concreto de objeto, ¿qué altura mínima debería tener?

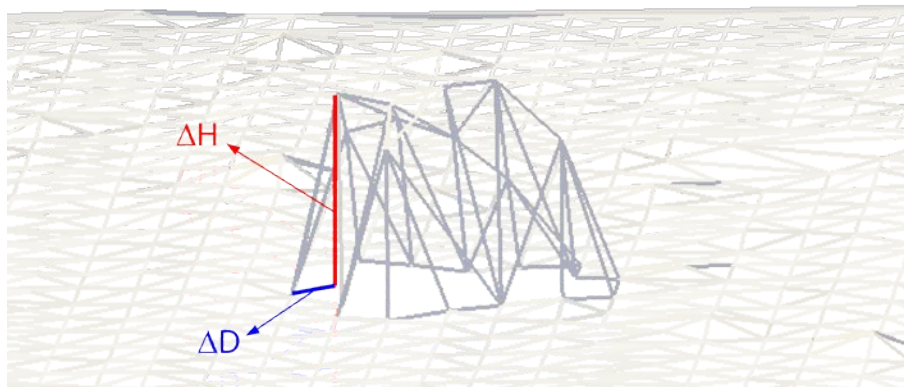


Figura 217: Relación de un punto con su entorno: Desnivel y distancia a un vecino.

Este algoritmo se podría clasificar dentro del grupo “basados en TIN”, explicado en el apartado 4.2.4.2.e).

#### 5.4.2.2. Proceso operativo

El proceso operativo comenzaría por un establecimiento de las relaciones vecinales entre todos los puntos que forman el modelo. Para ello se recurre al algoritmo propuesto para calcular la triangulación de Delaunay de manera rápida, explicada en el apartado 5.2 de este documento. De esta forma, se tendrían las relaciones que tiene cada punto con su entorno, donde se establecerían las consideraciones oportunas.

En el cálculo de la triangulación, se debería tener en cuenta el parámetro de proximidad entre puntos, de tal forma que no se relacionen puntos que están muy alejados en el espacio. Este parámetro evita errores en las consideraciones de diferencia de altura entre puntos.

Por otro lado, la información podría proceder de una clasificación previa, por lo que algunos puntos podrían estar clasificados. En este sentido y para mejorar las consideraciones posteriores, no se deberían tener en cuenta aquellos puntos que ya han sido clasificados como objetos sobre la superficie del terreno. Es decir, sólo se utilizarán aquellos puntos que son terreno o no clasificados.

Una vez establecidas las relaciones, comenzaría el proceso de clasificación en función de las diferencias de altura entre un punto y sus vecinos. Este proceso tiene una ventaja computacional y es la posibilidad de ser ejecutado en paralelo o con varios hilos de ejecución. Esta posibilidad aprovecharía al máximo aquellos ordenadores con varios núcleos o procesadores y aumentaría la velocidad de cálculo.

Por tanto, una vez establecidas las relaciones entre todos los puntos que no se han clasificado todavía, se procede a la clasificación según las relaciones geométricas. El algoritmo de la triangulación relacionará los puntos mediante triángulos por lo que se procederá al análisis de cada triángulo para este propósito. Este proceso conlleva tres tareas:

- Primero, se realiza una búsqueda de aquellos puntos cuya diferencia de cota con sus dos vecinos de triángulo sea superior a la altura mínima establecida como parámetro de inicio. Aquellos puntos que cumplan esta condición serán clasificados con el valor indicado inicialmente.
- Una vez terminada esta búsqueda, se procederá a localizar aquellos puntos que tengan una diferencia de cota superior a sus vecinos y que ambos hayan sido clasificados previamente.
- Por último, se realizará un tercer análisis de la triangulación donde serán clasificados aquellos puntos cuya cota sea superior a algún punto previamente clasificado como elevado.

Estos análisis son muy rápidos ya que la toma de decisiones apenas conlleva cálculo matemático. El resultado es un conjunto de puntos cuya cota supera a la de su entorno una cantidad superior a la marcada como umbral. Este algoritmo precisa iteración, debido a que un punto clasificado podría estar ocultando puntos vecinos que no han sido clasificados por no cumplir las condiciones con su entorno. Esto suele darse en zonas interiores de los objetos, como puede ser en edificaciones o zonas arboladas. En la siguiente iteración, los puntos que ahora se han clasificado no se considerarían por lo que se podrían detectar estos puntos elevados.

Para subsanar este problema, se realiza un cálculo adicional. Con los puntos previamente clasificados como elevados se calculan los límites que circundan al conjunto. Por tanto, aquellos que se encuentren dentro de estos límites y no hayan sido clasificados son susceptibles de serlo como elevados. Para ello, deberán cumplir la condición de tener una cota superior a la media de las cotas de los puntos que forman el límite. Con ello se evita clasificar puntos pertenecientes a islas de superficies interiores, por ejemplo, patios de edificios (Arranz, et al., 2012).

En la figura 218, se muestra un ejemplo de los puntos clasificados por el algoritmo en una edificación que contiene un patio interior. Los puntos de color rojo se han clasificado con el algoritmo anteriormente expuesto. Por tanto, son considerados como elevados. Los puntos de color verde y de color amarillo todavía no han sido clasificados. Los puntos verdes pertenecen al suelo y, por tanto, su cota será muy inferior a los clasificados. Los puntos de color amarillo pertenecen a la azotea del edificio y su cota será similar a la de los puntos clasificados. Generando un límite como unión de los puntos clasificados y utilizando la información altimétrica, se podrán clasificar como elevados los puntos de color amarillo.

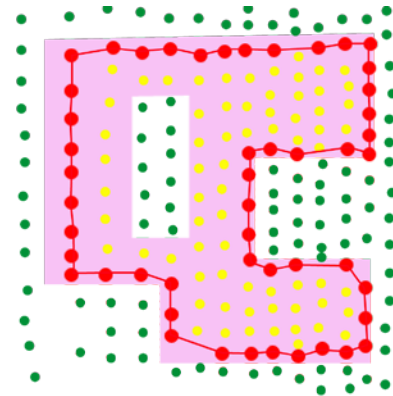


Figura 218: Puntos clasificados y límite generado con ellos.

La descripción del algoritmo para la extracción de los límites exteriores de un conjunto de puntos dado se explica en el apartado 5.5.

El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.1.

### 5.4.2.3. Resultados obtenidos

Se han realizado pruebas con ficheros de puntos procedentes de un vuelo LiDAR de una zona rústica (más detalles de la zona en el apartado 7.1.1). Cada archivo contiene entre medio millón y millón y medio de puntos. Se han realizado pruebas con diferentes cantidades de puntos para conocer la velocidad y para comprobar la dependencia del algoritmo respecto del número de puntos.

Las pruebas han sido realizadas con un ordenador portátil con procesador Intel i7, seis gigabytes de RAM y ocho núcleos. Tanto el sistema operativo como la aplicación operan a 64 bits.

Tabla 18: Resultados obtenidos del algoritmo de clasificación en función de la geometría.

Ficheros	Puntos	Clasificados	Tiempo	Ratio1
1	1258765	6856	00:52	1.45
2	2513012	28397	01:58	1.28
4	4706593	66446	05:18	0.89
8	9392445	111928	14:39	0.64
16	14142977	214524	33:56	0.42

La relación entre cantidad de puntos y tiempo de cálculo no es lineal. Aun así, se llegan a clasificar 14 millones de puntos en 34 minutos, aproximadamente.

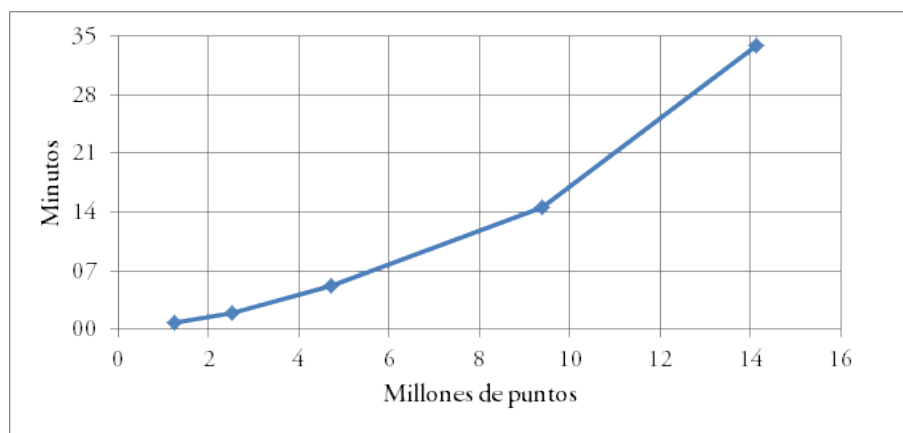


Figura 219: Gráfico con la relación entre cantidad de puntos y tiempo invertido para clasificar en función de la geometría.

Los resultados obtenidos son satisfactorios, pero el algoritmo presenta algunas carencias. El hecho de utilizar únicamente geometría para detectar objetos permite discriminar la información perteneciente al terreno de los objetos que se sitúan sobre él, pero prácticamente no permiten caracterizarlos. Por ejemplo, una edificación al menos tendrá tres metros de altura respecto del suelo, por lo que diferencias menores podrán corresponder a vegetación baja, elementos ornamentales urbanísticos, mobiliario urbano o vehículos. Sin embargo, existe vegetación que supera ampliamente los tres metros. En este sentido, habría que recalcar que en un proceso de inventario de patrimonio será muy importante separar la información perteneciente a vegetación de la edificación.

Por tanto, se plantean dos posibles soluciones:

1. Utilizar un proceso posterior que permita diferenciar ambos elementos. En este sentido, se propone un nuevo algoritmo presentado en el apartado 5.4.7, que permite detectar los puntos pertenecientes a edificaciones, considerando el resto como vegetación.
2. Utilizar información radiométrica contenida en cada punto. En este sentido, se ofrecen también una subdivisión, con sus respectivas propuestas en forma de algoritmo:

- Utilizar la intensidad registrada por el láser. El algoritmo se presenta en el apartado 5.4.5.3.
- Utilizar información radiométrica adicional, definida por el color del objeto registrado. No toda la información procedente de un dispositivo láser tiene asignado un color según sus componentes RGB. Por tanto, esta información debería ser incorporada en un proceso posterior a partir de imágenes aéreas. El algoritmo propuesto se puede consultar en el apartado 5.4.5.2.

### 5.4.3. En función del orden de registro

#### 5.4.3.1. Introducción

A partir de los datos procedentes de un sensor láser de barrido aerotransportado (ALS), se propone este algoritmo que pretende clasificar los objetos detectados y medidos por el dispositivo láser en función de la posición geométrica que tienen respecto de su entorno inmediato en el momento del registro. No sería aplicable a datos terrestres (TLS) puesto que los sensores utilizados en estos proyectos no almacenan la información de la misma manera. En cambio, sí podría ser utilizado en proyectos de sensores móviles (MMS), cuyo registro está basado en sensores láser 2D, como en ALS.

El algoritmo utiliza una característica de funcionamiento del sensor láser: su medición secuencial lineal. Es decir, es un sensor lineal que va registrando los puntos mediante un movimiento oscilatorio en sentido transversal al avance del avión. A su vez, el avión lleva una determinada trayectoria con una determinada velocidad, por lo que el registro lineal del dispositivo láser se convierte en un registro en forma de zigzag o sinusoidal o de líneas paralelas, en función del tipo de sensor que se utilice (más información en el apartado A.4.4). Esta característica no se presenta de forma inmediata en el archivo de datos debido a la alta densidad de información, gracias a la alta velocidad de movimiento de oscilación del dispositivo láser.

Por tanto, se puede decir que un punto se relaciona con el punto anterior y posterior en el fichero, ya que fueron medidos de una forma secuencial. Esta relación de vecindad local podría evitar tener que calcular una triangulación con todos los puntos del archivo lo que aumentaría la velocidad en un proceso de clasificación de la información. De hecho, se podrían evitar ciertos errores acaecidos cuando se relacionan puntos que en el espacio realmente no son vecinos.



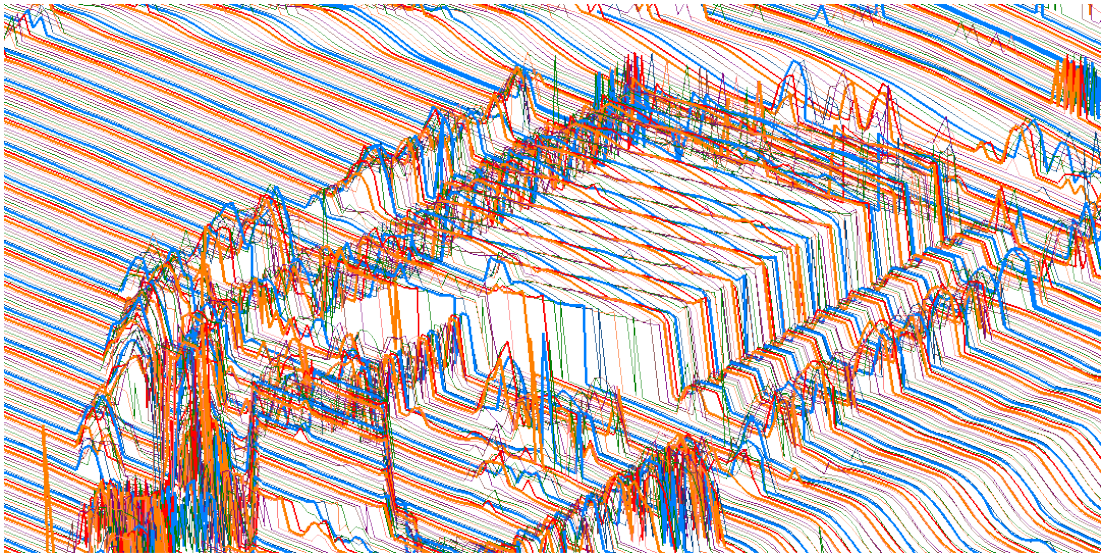


Figura 220: Ejemplo del registro de un sensor ALS.

En la figura 220, se muestra un ejemplo de un archivo LAS donde se han unido mediante líneas de diferente color los diferentes barridos realizados por el sensor. Se puede apreciar la estructura de los objetos que está midiendo. Se trata de aprovechar esta información para poder clasificar los puntos. La figura 221 muestra la fotografía aérea de la zona registrada, donde se pueden relacionar los diferentes puntos elevados con los objetos de la zona: edificios y árboles, básicamente.

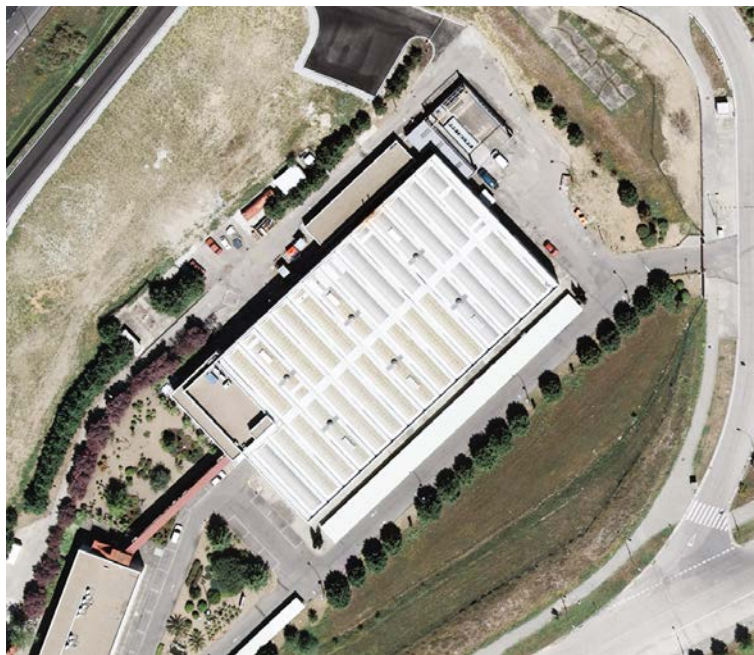


Figura 221: Imagen aérea de la zona registrada por el sensor.

Este algoritmo se podría clasificar dentro del grupo “En función de la dirección de escaneado”, explicados en el apartado 4.2.4.2.c).

### 5.4.3.2. Proceso operativo

El proceso operativo de este algoritmo supone que todos los puntos se han almacenado según su momento de registro, habría que comparar la diferencia de cota entre puntos vecinos para hacer las consideraciones de clasificación oportunas. Como precaución, se debería indicar un parámetro de distancia máxima para no considerar dos puntos como vecinos en un posible desorden interno del fichero.

Como característica operativa, se tendrá en cuenta cuándo un perfil está elevado respecto de los puntos precedentes y siguientes, para saber si se trata de un conjunto de puntos sobre un objeto o sobre el suelo desnudo. Aquellos puntos que estén elevados de forma aislada serán considerados vegetación.

El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.2.

### 5.4.3.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos mejoran en algunos aspectos lo obtenido mediante el algoritmo basado en la triangulación de Delaunay. Sin embargo, su mejor virtud está en la velocidad de proceso ya que no está ralentizado por el tiempo de cálculo para realizar las relaciones de vecindad. Por otro lado, si no se utilizan los parámetros de diferencia de altura con cuidado puede llegar a clasificar puntos erróneamente.

Por tanto, se podría llegar a la conclusión de que este proceso podría ser un buen punto de comienzo para clasificar puntos, por lo que podría ser el paso previo a procesar la información mediante un algoritmo basado en las relaciones de vecindad dadas por una triangulación de Delaunay. No obstante, en zonas con pocos cambios bruscos de pendiente y con poca densidad de objetos, clasifica de forma óptima. Como ejemplo, en las siguientes figuras se muestra la clasificación realizada del ejemplo mostrado en la figura 220.

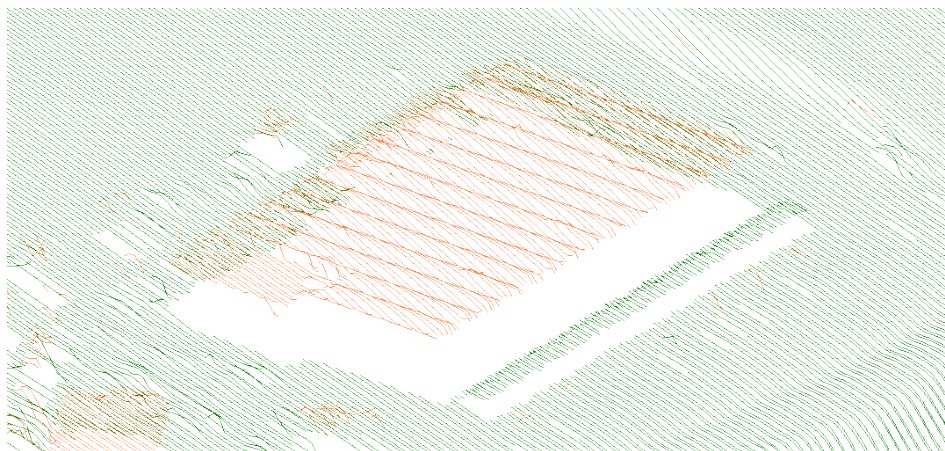


Figura 222: Líneas de registro con los puntos clasificados como “suelo desnudo” (color verde) y edificación (color naranja).

La figura 222 muestra los puntos clasificados como “suelo desnudo” y “edificación” y en la figura 223, se muestran además los puntos clasificados como “vegetación” que son aquellos que tienen una forma irregular y no demasiado extensa.

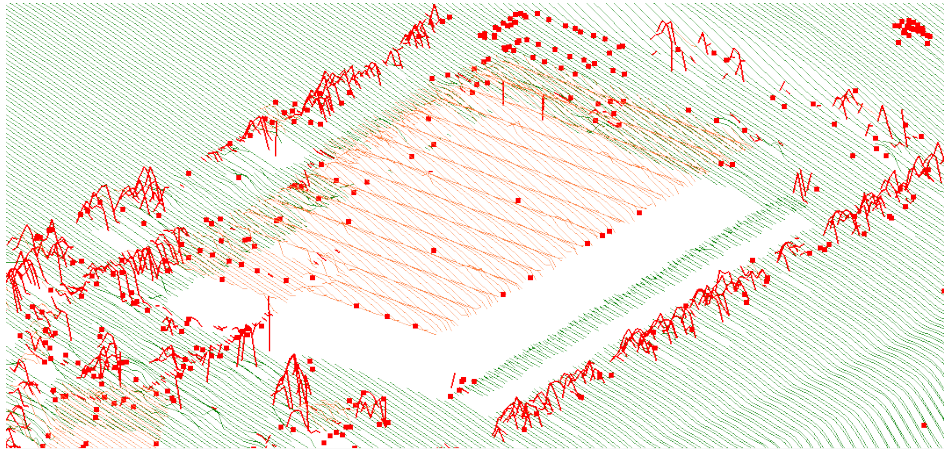


Figura 223: Líneas de registro con los puntos clasificados como “suelo desnudo” (color verde), edificación (color naranja) y otros objetos (color rojo) entre los que se encontraría la vegetación o mobiliario urbano.

#### 5.4.4. En función de la radiometría

##### 5.4.4.1. Introducción

A continuación, se ha procedido a estudiar la posibilidad de realizar clasificaciones de elementos en función de la información radiométrica que tiene cada punto. Esta información podría venir representada por el color registrado según las componentes rojo, verde y azul (RGB) o por la intensidad registrada por el láser. La primera opción no siempre está disponible, aunque podría añadirse en un proceso posterior a partir de la información multispectral adquirida mediante otro sensor, normalmente una cámara óptica o infrarroja. La segunda opción es una de las propiedades de la medida con láser, como así se explica en el apartado 3.3.

El estudio y desarrollo de algoritmos se ha dividido en función de la información disponible.

##### 5.4.4.2. Información multispectral

Se ha desarrollado un algoritmo de clasificación de puntos en función del valor de información multispectral o color RGB que tiene cada punto. Esta información no suele incorporarse originalmente con el fichero de medidas tomadas por el sensor láser. Por tanto, adicionalmente se han diseñado una serie de herramientas que permitirían la asociación de este tipo de información. Para ello, evidentemente, se necesita un fichero adicional con una imagen de la misma zona. Esta imagen podría estar georreferenciada o no.



Se han contemplado los siguientes supuestos, en función de los datos que se disponen de la imagen del objeto:

- Imagen cónica, sin parámetros de orientación interna ni externa.
- Imagen cónica, con parámetros de orientación interna y externa.
- Imagen en proyección ortogonal, es decir, una ortofotografía.

Por cada uno de estos supuestos, se ha desarrollado un algoritmo que permite extraer la información e incorporarla a la información geométrica. Dichos algoritmos se exponen en el apartado 5.6. Habría que resaltar que la información raster de la imagen puede estar almacenada en diversos formatos contemplados por la herramienta planteada: BMP, TIFF o JPEG. Por otro lado, reseñar que, aunque la información LiDAR no suele venir con información radiométrica, su estructura sí contempla su almacenamiento por lo que, una vez incorporada esta información adicional, podrá ser fácilmente almacenada en disco en el formato estándar LAS para su posterior utilización.

Una vez incorporada la información, se procede al diseño de un algoritmo que permita la diferenciación de objetos en función del valor de RGB que tienen. La primera aproximación consistió en la construcción de una tabla de asignación, de tal manera, que para cada terna de RGB determinado se le asignara un valor de clasificación, permitiendo un rango de movimiento en alguna de las componentes. A partir de estas condiciones, el algoritmo realiza las relaciones de vecindad utilizando la triangulación rápida de Delaunay explicada en el apartado 5.2 e intenta formar superficies con los puntos vecinos que tienen condiciones similares, según la tabla antes construida.

Los resultados obtenidos mediante esta primera aproximación no resultaron muy alentadores, debido a la diferente respuesta que puede tener cada punto en función de la luz recibida, ángulo de reflexión o características del material, aun perteneciendo al mismo objeto.

Por ello, se realizó una segunda aproximación, que consistió en transformar la información del color RGB al sistema HVS (tono, valor y saturación). Las fórmulas de transformación de una terna a otra están explicadas en el apartado 5.6.5.

Los resultados tampoco son plenamente satisfactorios en casos de registro aéreo (ALS) puesto que existen puntos pertenecientes al suelo desnudo y a objetos que tienen la misma respuesta multiespectral. Sin embargo, una utilidad muy interesante se plantea cuando se dispone de un archivo de puntos láser de una fachada arquitectónica (TLS). En este tipo de objetos, se utilizan diferentes tipos de materiales cuya información radiométrica es muy diferente y cuya segmentación sería interesante. Esta segmentación daría lugar al agrupamiento de materiales, como puede ser madera, ladrillo, piedra o forja, por lo que podría ser una información muy valiosa en tareas de restauración del patrimonio.

Sin embargo, las cámaras no métricas utilizadas en proyectos de registro de objeto cercano, aunque pueden ser suficientes para registrar geométricamente sobre ellas, no suelen

tener la resolución multispectral de las cámaras métricas, por lo que la diferenciación de materiales en función del color registrado se complica.

#### 5.4.4.3. Información de intensidad

La segunda fuente de información adicional que se puede utilizar es la intensidad. Este valor es el cociente entre la energía reflejada por el objeto y la energía emitida por el sensor láser. Todos los sensores almacenan este valor, por lo que viene de origen, no siendo necesario incorporarlo en un proceso posterior, como ocurre con el color. El valor de la intensidad reflejada por cada objeto depende de varios factores: Tipo de sensor, material y rugosidad de la superficie, luz ambiental o ángulo de reflexión.

Por tanto, no es un valor completamente fiable para realizar una clasificación óptima, pero puede ayudar en combinación con otros parámetros, como se verá posteriormente. Con todo, existe una tabla de valores de intensidad de un conjunto de superficies tipo, que se encuentra en el apartado A.4.1.3 de este documento. No obstante, si se está trabajando con ficheros donde los diferentes elementos tienen un gran contraste en el valor de la intensidad, podría adaptarse muy bien un algoritmo que clasificara según este parámetro. Es el caso de terrenos rústicos, donde la respuesta asociada al terreno desnudo y la vegetación es muy diferente.

Por ello, se ha desarrollado un algoritmo que, partiendo de un listado de condiciones, clasificara los puntos de un fichero con datos láser. Estas condiciones estarían compuestas por un valor de intensidad, un rango de movimiento y un valor de clasificación. Al igual que el algoritmo anteriormente explicado, a partir de estas condiciones, el algoritmo realiza las relaciones de vecindad utilizando la triangulación rápida de Delaunay explicada en el apartado 5.2 e intenta formar superficies con los puntos vecinos que tienen condiciones similares, según la tabla antes construida.

Los resultados obtenidos en terrenos rústicos han sido medianamente satisfactorios, pudiendo realizar una clasificación muy rápida de los ficheros, con poco margen de error. Sin embargo, existen zonas del suelo y de objetos que tienen una respuesta de intensidad similar como el asfalto y la vegetación. Por tanto, sólo con la información de la intensidad no se considera adecuado clasificar puntos en casos aéreos.

Al igual que en el algoritmo que utiliza la información relativa al color, este algoritmo también puede emplearse para caracterizar materiales de obras arquitectónicas, cuya respuesta de intensidad es muy diferente. Además, también podría ser utilizado para detectar vegetación sobre roca o piedra, de tal manera, que podría estudiarse el proceso de erosión de ésta, como podría ocurrir en la documentación de petroglifos.

El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.3.

## 5.4.5. En función de la geometría y radiometría

### 5.4.5.1. Introducción

En los epígrafes anteriores, se han planteado cuatro algoritmos diferentes para la clasificación de puntos procedentes de sensores láser: dos atendiendo a la información geométrica de la información y otros dos atendiendo a la información radiométrica de la información. En todos ellos se han analizado las virtudes y carencias que tienen los resultados, no siendo ninguno de ellos completamente efectivo.

Por ello, se contempla una nueva familia de algoritmos que utilice la información de manera conjunta: geometría más radiometría. Al igual que en la familia anterior de algoritmos, se plantean dos posibles algoritmos en función del tipo de información radiométrica que se disponga.

### 5.4.5.2. Información multiespectral

El planteamiento inicial tiene la misma base que el algoritmo propuesto en el apartado 5.4.4.2, es decir, se establece una tabla de condiciones donde, en función de un determinado valor de RGB (o HVS) se asigna una clasificación a un punto. Sin embargo, ahora se añade el parámetro diferencia de altura respecto del entorno, es decir, la posición geométrica del punto respecto de sus vecinos. Esto limita más aún la selección de puntos que cumplan dichas condiciones, por lo que se diseña una tabla donde se clasifica vegetación y edificaciones de manera simultánea. Con esto se cubriría una de las principales carencias que tenía el algoritmo que sólo contemplaba geometría, puesto que no podía diferenciar entre ambos tipos de objetos.

Al igual que en los algoritmos anteriores, también se realiza una triangulación rápida de Delaunay para poder establecer las relaciones entre puntos y poderlos agrupar según sus similitudes.

Los resultados obtenidos son satisfactorios, sobre todo en zonas de carácter urbano. El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.4.a).

### 5.4.5.3. Información de intensidad

Al igual que el algoritmo anterior, el planteamiento inicial tiene la misma base que el algoritmo propuesto en el apartado 5.4.4.3, es decir, se establece una tabla de condiciones donde, en función de un determinado valor de intensidad, se asigna una clasificación a un punto. Como el caso anterior, ahora se añade el parámetro diferencia de altura respecto del entorno, por lo que se limita más aún la selección de puntos que cumplan dichas



condiciones. Para poder establecer las relaciones entre puntos y poder agruparlos según sus similitudes, también se realiza una triangulación rápida de Delaunay.

Los resultados obtenidos en terrenos rústicos han sido satisfactorios, pudiendo realizar una clasificación muy rápida de los ficheros, con poco margen de error. Esto, sin embargo, no resulta de aplicación en un entorno urbano. El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.4.b).

### 5.4.6. Detección de puntos erróneos

Una de las primeras tareas a realizar cuando se procesa información LiDAR es la detección de puntos erróneos procedentes de medidas inadecuadas o reflejos en zonas que no son objeto del proyecto. En general, en proyectos ALS se pueden registrar puntos aéreos procedentes de objetos “flotando” en el aire, como pueden ser pájaros u objetos volantes (aviones pequeños, cometas, etc.). Además, se producen medidas erróneas, tanto en TLS como en ALS, cuando se mide sobre superficies muy pulidas o con agua. Estos errores pueden producir puntos cuya cota es muy diferente a su entorno más inmediato: están muy elevados o hundidos.

Por otro lado, podría ser interesante clasificar aquellos puntos que se encuentran aislados en un entorno 3D, por ejemplo, los procedentes de cables eléctricos. Una de las características del LiDAR es que captura muy bien elementos metálicos por tener un pulso de respuesta de gran intensidad. Por ello, a pesar de que los cables de transporte de electricidad tienen una sección reducida, pueden ser capturados por el sensor láser. Pero su altura respecto del suelo provoca que estén relativamente aislados, por lo que se pueden identificar fácilmente.

#### 5.4.6.1. Elevados

Esta herramienta permitirá detectar puntos con una cota muy superior a su entorno. Para ello, se necesitará indicar cuál es el radio de búsqueda de los puntos que conforman el entorno del punto. Con todos los puntos extraídos, se calcula la cota media y la desviación típica del conjunto. Esta desviación típica, obtenida a partir de las diferencias de cada una de las cota con el valor medio, dará idea de la homogeneidad de las cotas del entorno. Si la cota del punto es superior que la cota media más un número  $k$  de veces la desviación típica del conjunto, el punto se clasificaría con el tipo de punto indicado. Este número debe indicarse previamente.

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \rightarrow \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{H} - H_i)^2}{n-1}} \rightarrow H_p > \bar{H} + k \cdot \hat{\sigma}$$

El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.5.a).

### 5.4.6.2. Hundidos

Al igual que la herramienta de puntos elevados, esta herramienta permitirá detectar puntos con una cota muy inferior a su entorno. Los parámetros solicitados son los mismos: radio de búsqueda de puntos en el entorno y un factor multiplicador de la desviación típica. En este caso, se extraen los puntos del entorno y se calcula la cota media y la desviación típica del conjunto. Si la cota del punto es inferior que la cota media menos un número  $k$  de veces la desviación típica del conjunto, el punto se clasificaría con el tipo de punto indicado.

$$\overline{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \rightarrow \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{H} - H_i)^2}{n-1}} \rightarrow H_p < \overline{H} - k \cdot \hat{\sigma}$$

El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.5.b).

### 5.4.6.3. Aislados

Las dos herramientas anteriores permiten detectar puntos que tienen una cota errónea y que, además, no representan un conjunto. Sin embargo, en ocasiones es necesario seleccionar puntos que se encuentran aislados del conjunto de puntos registrados. La característica de aislado se podrá definir indicando cuántos vecinos tiene que tener el punto en un entorno tridimensional, es decir, indicando el radio de una esfera. Si en ese radio de acción, no se ha encontrado más de un número mínimo de puntos, se clasifica como aislado. Como se indicó anteriormente, puede ser interesante para encontrar puntos pertenecientes a cables eléctricos puesto que, sin estar mal medidos, se encuentran aislados del conjunto de puntos medidos sobre la tierra y tienen apenas tres o cuatro puntos vecinos alrededor, pertenecientes igualmente a cables. Si se intentaran seleccionar estos puntos con la herramienta de puntos elevados no se podría, pues los puntos de alrededor modificarían la cota media del conjunto y su desviación típica.

El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.5.c).

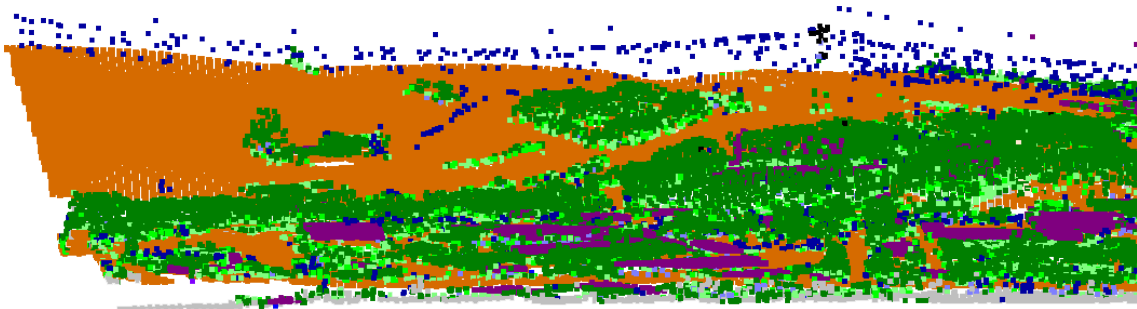


Figura 224: Vista oblicua de un ejemplo donde se aprecian los puntos sobre las líneas eléctricas, elevados sobre el resto de puntos.

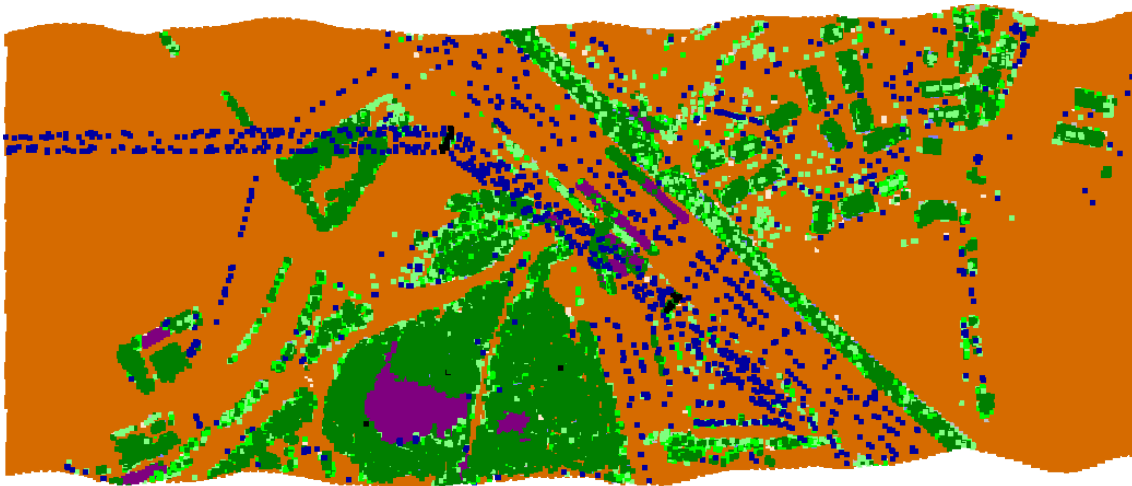


Figura 225: Vista cenital del mismo ejemplo, con puntos sobre líneas eléctricas (color azul).

#### 5.4.7. Detección automática de puntos pertenecientes a edificaciones

Con estas operaciones se finalizaría la primera fase del algoritmo cuyo resultado sería un conjunto de puntos clasificados como elevados. Sin embargo, ahora habría que discriminar entre puntos pertenecientes a edificaciones y puntos pertenecientes a otros objetos, fundamentalmente vegetación arbórea.

Como muestra la figura 226, ahora se dispondría de un conjunto de puntos donde se presentan dos clasificaciones: puntos no clasificados como elevados (puntos de color amarillo) y puntos clasificados como elevados (puntos de color rojo y verde). Sin embargo, ahora se debe abordar la separación entre edificación (punto de color rojo) y el resto de objetos, por ejemplo, árboles (puntos de color verde).

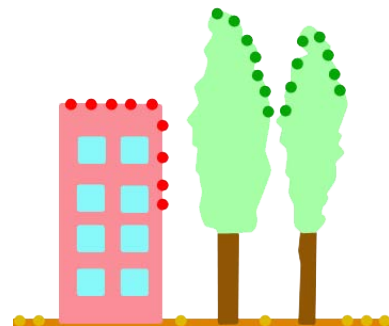


Figura 226: Puntos clasificados sobre árboles y edificios.

Los puntos pertenecientes a edificaciones medidos por el sensor LiDAR tienen dos procedencias fundamentales: puntos pertenecientes al tejado y puntos pertenecientes a las fachadas. Este segundo conjunto de puntos no resulta útil para realizar cartografía, por lo que debería ser seleccionado y clasificado o incluso eliminado. El primer conjunto de puntos permitirá, en procesos posteriores, poder extraer el límite de la zona edificada. Por tanto, ahora se establecen dos procesos: uno para detectar los puntos sobre fachadas y otro para detectar los puntos sobre los tejados.

En la figura 227, se muestra un ejemplo de los puntos registrados por el sensor sobre una edificación. De color rojo, se muestran los puntos medidos sobre la azotea y que interesa clasificar como edificación. De color verde, se encuentran los puntos medidos sobre el suelo y que no han sido clasificados como elevados. De color azul, se muestran los puntos medidos sobre la fachada. Muchos de estos puntos se habrán clasificado como elevados por

su condición geométrica con respecto al entorno, pero no son interesantes para representar la edificación, por lo que deben ser aislados o eliminados.

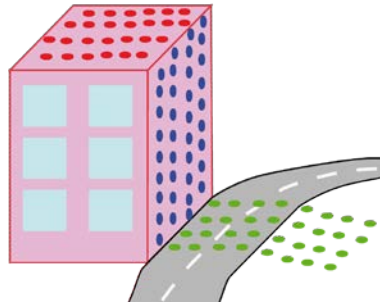


Figura 227: Puntos sobre cubierta (rojo), sobre fachada (azul) y suelo (verde).

#### 5.4.7.1. Fachadas

El proceso para detectar puntos sobre fachadas se basa en el hecho de que los puntos pertenecientes a estas, medidos en el mismo barrido del sensor, deben tener, aproximadamente, la misma localización planimétrica. Es decir, se van a encontrar en la misma vertical. Por tanto, aquellos puntos que habiendo sido clasificados como elevados y que tengan aproximadamente las mismas coordenadas planimétricas serán clasificados como fachadas. Se pueden establecer más condiciones para que no se seleccionen puntos erróneos, por ejemplo, un número mínimo de puntos en esa vertical. La precisión en la definición de la vertical será, aproximadamente, la que haya tenido el sensor a esa altura de vuelo.

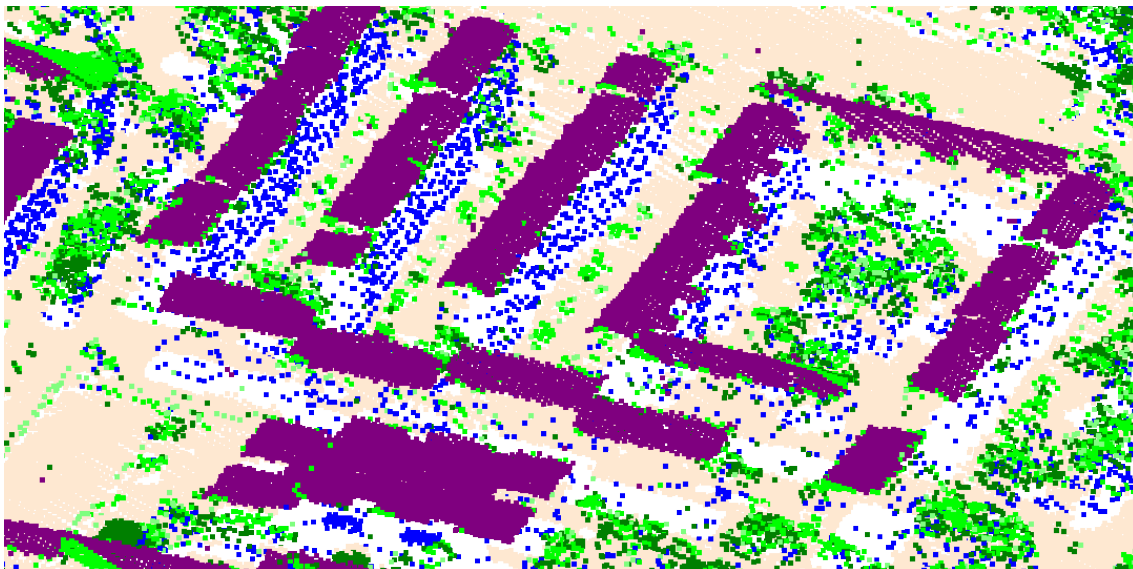


Figura 228: Ejemplo de zona edificada con puntos sobre fachadas (color azul) y punto sobre cubierta (color morado).

El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.6.a).

#### 5.4.7.2. Cubiertas

El segundo proceso que clasificaría los puntos finalmente como edificios, se basa en la distribución que los puntos tienen sobre este tipo de objetos. Las cubiertas de las edificaciones pueden ser horizontales o inclinadas, pero forman una superficie de grandes dimensiones que define un plano (figura 229). Bajo estas dos premisas se ha diseñado un algoritmo que permite encontrar estos puntos rápidamente.

Por tanto, inicialmente se calculará una triangulación únicamente con los puntos clasificados como elevados, donde también se encontrarán los puntos pertenecientes a los árboles. A continuación, se generará una relación de las pendientes aportadas por todos los triángulos generados y se irán agrupando estos en función de este valor, de tal forma que se vayan formando superficies mediante la unión de aquellos triángulos con inclinación similar. Estas superficies estarán definidas por un plano. Tras el agrupamiento, cuando las dimensiones de este plano superen un valor mínimo de superficie, se podrá considerar que pertenece a un tejado de una edificación, clasificando todos sus puntos.

El proceso es rápido y efectivo, planteando problemas en superficies onduladas o en aquellos tejados donde existan más objetos que los propios de la cubierta, por ejemplo, aparatos de aire acondicionado, chimeneas, etc.

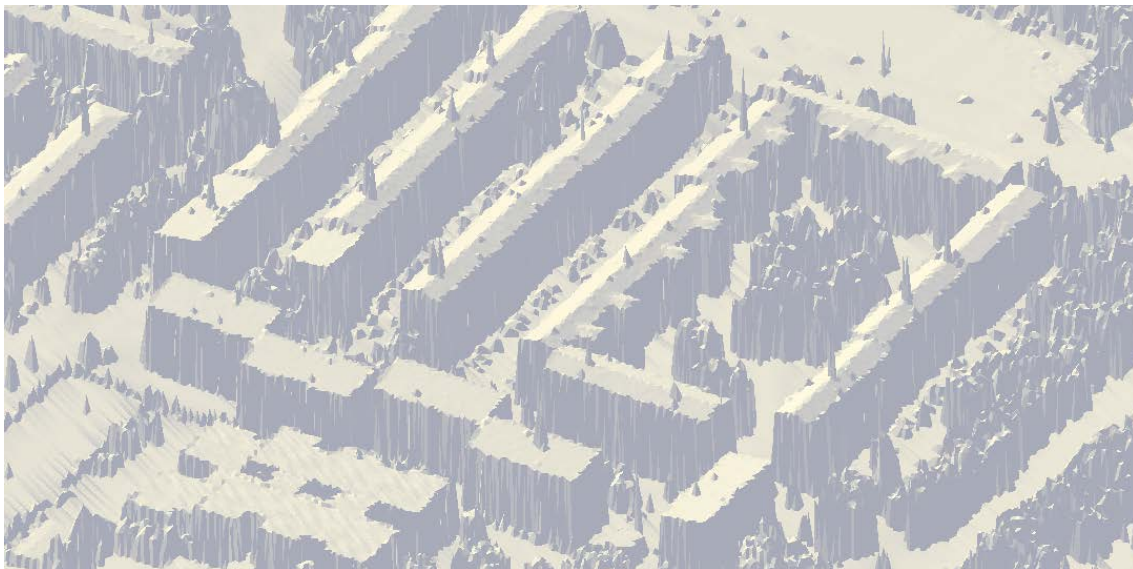


Figura 229: Mismo ejemplo triangulado, donde se pueden apreciar las cubiertas planas (horizontales e inclinadas) correspondientes a los edificios de la zona.

El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.6.b).

#### 5.4.8. Detección en función de la morfología

Otra de las posibles vías para clasificar puntos es tener en cuenta la morfología del terreno que se está midiendo. Es decir, podría desarrollarse un algoritmo que, analizando la morfología que describen los puntos, vaya comprobando si dichos puntos pertenecen al terreno desnudo o a un objeto sobre él. Por ello, se podría realizar un análisis de las curvas de nivel generadas y decidir cuándo una curva de nivel es posible en la zona y cuándo es “artificial”, desechando o clasificando los puntos que la forman. Para ello, se deberían hacer ciertas consideraciones como la equidistancia para la toma de decisiones o la superficie mínima que debe tener una curva de nivel.

Este algoritmo se basa en el desarrollo realizado para calcular las curvas de nivel directamente de la nube de puntos, sin tener que calcular un modelo digital previamente, el cual está descrito en el apartado 5.7.1. Por tanto, se generaría un bucle donde se fueran calculando las diferentes curvas de nivel desde la cota más alta a la más baja del archivo a tratar. Las curvas de nivel se generarían utilizando el algoritmo de generación de límites exteriores expuesto en el apartado 5.5. Si la superficie de una determinada curva de nivel no supera un determinado umbral se podría considerar que es el resultado de considerar puntos pertenecientes a objetos, por ejemplo, árboles.

El algoritmo tiene un buen comportamiento en zonas rústicas, donde los objetos no tienen grandes extensiones por lo que se pueden encontrar de manera sencilla. También se ha probado con datos TLS y también ha permitido localizar objetos de manera eficaz. Sin embargo, en entornos urbanos no ha tenido una respuesta adecuada, debido a que los objetos que se dan mayoritariamente, es decir, edificaciones, tienen grandes extensiones por lo que es difícil aislarlos de otras formas de terreno. No obstante, se podría avanzar más en este sentido, teniendo en cuenta la posición de las diferentes curvas de nivel y las pendientes que arrojan. Por ejemplo, un edificio podría generar varias curvas de nivel todas ellas de área similar y apiladas, por lo que se podrían detectar de manera sencilla.

El ejemplo de las imágenes siguientes corresponde a una zona registrada mediante láser escáner terrestre (TLS) donde figuran árboles, edificaciones, marquesinas, coches, muros, farolas y muchos puntos no deseados “flotando en el aire”. Mediante el algoritmo basado en morfología se han clasificado los puntos, detectando todos estos objetos. Se muestran las curvas de nivel que arrojan y cuáles son consideradas procedentes de objetos y cuáles del terreno, lo que permite clasificar los puntos que las originaron. Finalmente, se muestra el curvado del terreno desnudo.

El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.7.



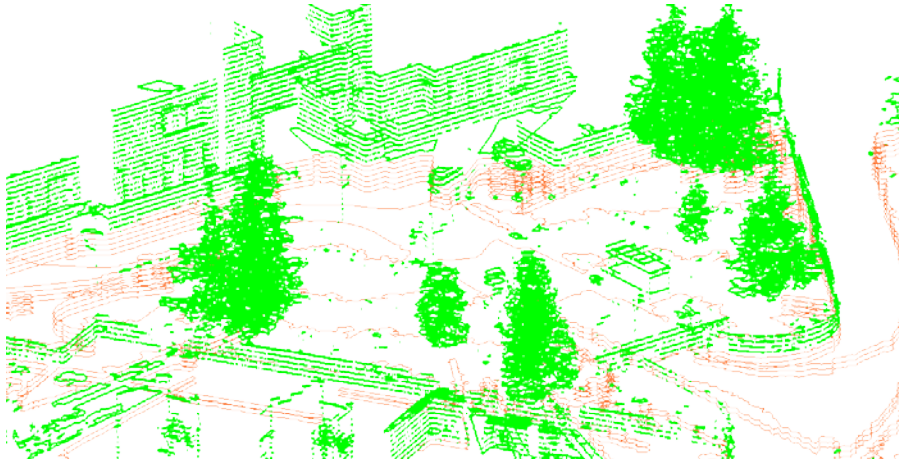


Figura 230: Zona registrada mediante TLS con las curvas de nivel calculadas. Las curvas consideradas procedentes de objetos se muestran en color verde y las procedentes del suelo están en color siena.

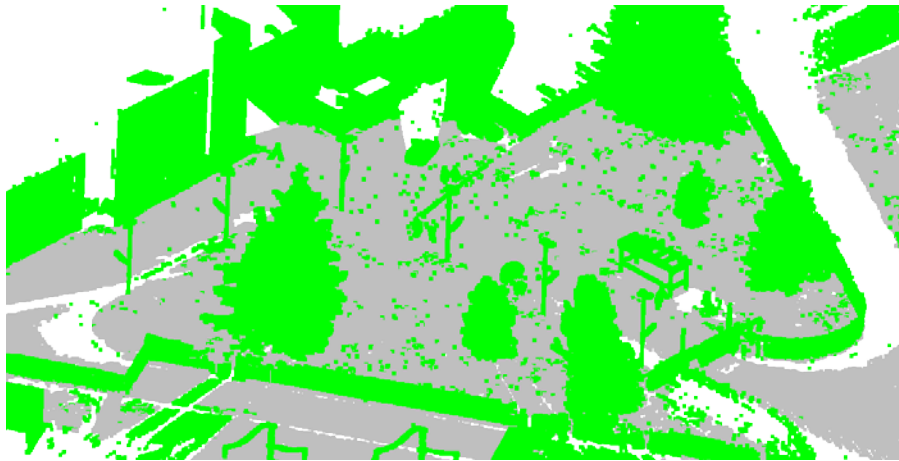


Figura 231: Puntos de zona anterior clasificados mediante el algoritmo en función de la morfología. De color verde se presentan los objetos detectados.



Figura 232 Vista cenital con las curvas de nivel del suelo desnudo del ejemplo anterior.

## 5.4.9. Superficie mágica

### 5.4.9.1. Introducción

Hasta ahora se ha expuesto un amplio abanico de posibilidades para clasificar puntos procedentes de una nube de puntos LiDAR. Unos algoritmos atienden a la geometría del entorno, otros a valores radiométricos, otros a la forma del registro y otros a la morfología de la zona. Todos ellos tienen virtudes y seleccionan adecuadamente puntos, en determinadas ocasiones. Sin embargo, también tienen carencias y no parecen infalibles para la totalidad de los casos. De hecho, en determinados ejemplos las carencias de un algoritmo pueden ser cubiertas con las virtudes de otro.

Por ello, se propone el siguiente procedimiento que utilizará los conceptos y planteamientos hasta ahora expuestos de una manera lógica y ordenada con el objetivo de clasificar de la mejor manera posible un conjunto de puntos procedentes de un sensor ALS. La idea, por tanto, reside en ir utilizando cada uno de los algoritmos para clasificar aquellas zonas que mejor se detectan, reduciendo las zonas donde no se han podido tomar decisiones o no son adecuadas para que otros algoritmos las traten.

Los resultados que se han obtenido, tanto en zonas rústicas como urbanas, densas o despobladas, han sido óptimos, ocasionando pocos problemas en casos singulares.

### 5.4.9.2. Desarrollo del algoritmo

El procedimiento comenzaría con una clasificación de los puntos en función del registro (5.4.3). Este paso es iterativo, repitiéndose mientras se clasifiquen más del 1% del total de puntos, aunque no suelen ser necesarias más de tres repeticiones.

A continuación, se clasificaría por afinidad aquellos puntos que previamente fueron clasificados como suelo. Esta relación de afinidad supone que si un punto se ha clasificado como suelo y tiene como vecino otro punto no clasificado con una cota similar o inferior, este punto podrá ser considerado igualmente suelo. Con estos puntos clasificados como suelo ya se puede obtener un MDT con suficiente densidad como para hacer proyecciones sobre él y tomar decisiones.

El tercer paso clasificaría en función de la intensidad (5.4.4.3), encontrando zonas con intensidad muy baja que hayan sido clasificadas erróneamente como edificación y cambiando su tipología a vegetación.

El cuarto paso buscaría puntos aislados incluidos en el MDT con cota superior a su entorno y les quitaría la clasificación de “suelo”. Posiblemente, serán pertenecientes a vegetación baja o mobiliario urbano, aunque posteriormente se comprobarán.

A continuación, se formarían los límites a partir de los puntos clasificados como edificación y se clasificarían aquellos puntos interiores que aun estuvieran sin clasificar.

El siguiente paso sería la búsqueda de puntos que estuvieran hundidos respecto del resto de los puntos de su entorno. Para ello se utilizaría el algoritmo explicado en el apartado 5.4.6.2.

A continuación, se procedería a comprobar las superficies de edificación formadas. Primero se formarían los límites y se comprobaría si estos límites tienen una variación en cota regular. Si es irregular no se tratará de una edificación, sino de un límite de arbolado. Si pasa este test, se procedería a proyectar sobre el MDT. Para ser una edificación más de la mitad de los puntos debe estar a una distancia mayor que la altura mínima de edificación. Si no, se tratará de algún otro tipo de objeto, como un puente o una pasarela.

En el octavo paso, se procederían a comprobar las superficies de vegetación encontradas. Podría ocurrir que alguna zona hubiese sido clasificada como vegetación, siendo edificación. Para ello se comprobará que la distribución de las cotas de los puntos que la conforman sigue la ecuación de un plano. Si esto es así, se tratará posiblemente de una edificación, por lo que se cambia su tipología.

Para ambas tipologías se calculará el límite exterior y se clasificarán como tal aquellos puntos interiores que tengan una cota superior.

En este punto, se tendrá la gran mayoría de los puntos clasificados pero pueden existir todavía puntos sin clasificar en aquellas zonas complicadas donde no se han podido establecer las correspondientes comparaciones. Para ello se procede a generar una triangulación con los puntos clasificados como “suelo” y como “indefinidos”. Aquellos puntos indefinidos que tengan cota menor que sus vecinos y estos hayan sido clasificados como “suelo”, serán clasificados como “suelo”. Esta comprobación será recursiva mientras se clasifiquen más del 1% del modelo. Una vez densificado y actualizado el MDT, se procederán a proyectar sobre él, aquellos puntos que todavía no han sido clasificados. En función del valor de la diferencia de altura se clasificarán como vegetación (alta, media o baja) o como “suelo”. Para comprobar las superficies formadas en el MDT, se vuelven a buscar aquellos puntos que, individualmente, tengan una cota superior a su entorno.

Para finalizar, se vuelven a comprobar las superficies de edificios de tal forma que si su valor de intensidad es muy bajo será debido a que son “vegetación”. Por el contrario, aquellas superficies de vegetación que presenten una distribución en forma de plano, será debido a que son “edificación”. Los puntos rodeados de puntos de una misma tipología son clasificados por “afinidad”.

El diagrama de flujo del algoritmo se encuentra en el apartado 6.1.4.8.

### 5.4.9.3. Resultados obtenidos

Se han realizado pruebas con ficheros de puntos procedentes de un vuelo LiDAR de una zona con gran densidad de vegetación (más detalles de la zona en el apartado 7.1.3). Los archivos tienen un número variable de puntos lo que permite conocer la velocidad y la dependencia del algoritmo respecto del número de puntos.

Las pruebas han sido realizadas con un ordenador con procesador Intel Core 2 Duo de 2.14 GHz y cuatro gigabytes de RAM. Tanto el sistema operativo como la aplicación operan a 32 bits.

Tabla 19: Resultados obtenidos del algoritmo de clasificación “Superficie mágica”.

Puntos	Tiempo	Ratio1	Puntos	Tiempo	Ratio1
90600	0:00:31	175355	1129717	0:26:17	42982
91152	0:00:36	151920	1147583	0:13:03	87937
130127	0:02:22	54983	1162024	0:19:41	59036
182500	0:01:43	106311	1184956	0:28:31	41553
203980	0:01:07	182669	1354678	0:24:56	54332
236684	0:10:05	23473	1392544	0:44:34	31246
261529	0:03:42	70684	1715663	0:41:01	41828
264895	0:01:37	163853	1804632	0:25:01	72137
407996	0:02:33	159998	1806621	0:24:52	72652
511426	0:20:57	24412	1932232	0:59:36	32420
517726	0:10:18	50265	2078531	1:03:57	32502
571380	0:07:22	77563	2181367	1:06:49	32647
611900	0:04:26	138023	2280962	0:41:57	54373
672211	0:07:53	85270	2380105	0:50:06	47507
702592	0:08:06	86740	2421484	1:07:41	35777
863300	0:11:39	74103	2451261	0:51:38	47474
932166	0:43:32	21413	2865224	1:21:32	35142
969537	0:19:37	49424	3240869	1:45:14	30797
974827	0:35:38	27357	3317705	1:45:51	31343

La relación entre cantidad de puntos y tiempo de cálculo es prácticamente lineal, obteniéndose una media de casi 70 mil puntos por minuto en un ordenador sólo con dos núcleos y 32 bits.

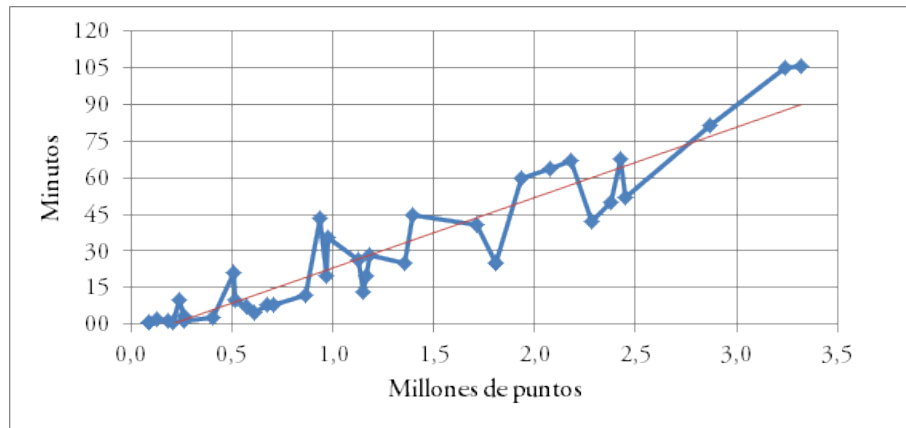


Figura 233: Gráfico con la relación entre cantidad de puntos y tiempo invertido para clasificar utilizando "Superficie mágica".

No obstante, para poder evaluar eficazmente el funcionamiento de este algoritmo, se procedió a realizar los test propuestos por la ISPRS para algoritmos de clasificación de puntos LiDAR. Los resultados de esta evaluación se encuentran en el apartado 7.2.

## 5.5. Extracción automática de líneas límite

Como se ha visto hasta ahora, con datos LiDAR es posible el modelado tridimensional de un objeto. Sin embargo, la calidad del modelo generado dependerá de la clasificación realizada. La clasificación puede realizarse atendiendo a diferentes criterios pero, lo más recomendable, sería agrupar los puntos en función del tipo de objeto donde reflejaron. Así, en el caso aéreo se podrá clasificar según puntos procedentes de edificios o vegetación; o, en el caso terrestre, se podrá clasificar en función del tipo de material de construcción, piedra, ladrillo, madera, etc. Por ello, sería interesante poder extraer cuál es el límite exterior que forman estos puntos y que definirá la posición y forma del objeto en cuestión (Wang, 2011).

Por tanto, se propone un algoritmo de extracción de límites a partir de nubes de puntos que tendrá como principal propósito extraer la información lineal de los límites de la zona que ocupan dichos puntos. Sin embargo, también tiene otro objetivo puesto que ya fue utilizado anteriormente, por ejemplo, para clasificar aquellos puntos interiores que no fueron clasificados por sus condiciones geométricas con el entorno. Para su correcto funcionamiento se debe indicar una distancia máxima para que dos puntos puedan formar el límite. Este valor es importante y depende de la densidad de puntos LiDAR medidos. Si su valor es pequeño, podrían no formarse ciertas superficies por encontrarse sus puntos más distanciados que este valor. Si su valor es grande, podrían no encontrarse ciertas concavidades existentes en la forma de las superficies.

El desarrollo conceptual del algoritmo se basa en la triangulación de Delaunay. El algoritmo de esta triangulación se basa en el establecimiento de unos puntos ajenos a la nube de puntos dato y externos a ésta (puntos ficticios), marcando los límites de actuación. Estos puntos generarán triángulos con los puntos exteriores de la nube por los cuatro costados (norte, sur, este y oeste), de tal manera, que se genera una superficie total siempre convexa (*convex hull*). Utilizando esta información, se podrían determinar qué puntos están unidos con estos puntos ficticios y utilizar los lados de los triángulos generados con estos para la formación del límite exterior de la nube de puntos. El proceso es rápido y sencillo y no implica el cálculo de toda la triangulación de la nube de puntos.

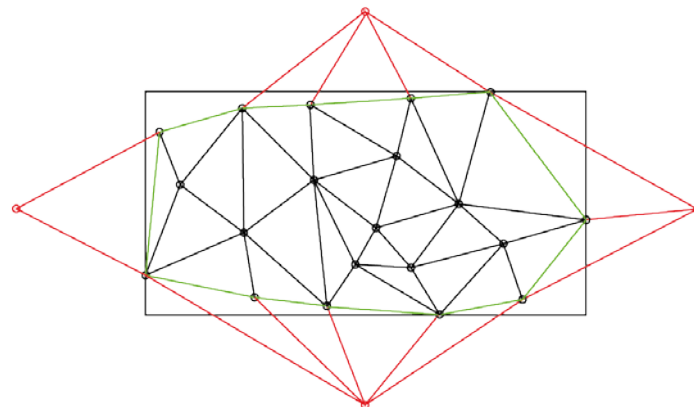


Figura 234: Triangulación de puntos (color negro) más puntos ficticios (color rojo). En verde, el límite exterior.



En la figura 234 se muestra la triangulación de un conjunto de puntos dato (color negro) utilizando los puntos ficticios (color rojo) para su cálculo. Los puntos ficticios son calculados según la extensión del conjunto de puntos dato. Los triángulos generados utilizando estos puntos ficticios (color rojo) proporcionarán el límite exterior del conjunto de puntos dato (color verde).

A continuación se muestra un ejemplo de los límites generados a partir de los puntos clasificados como edificación en una zona urbana.

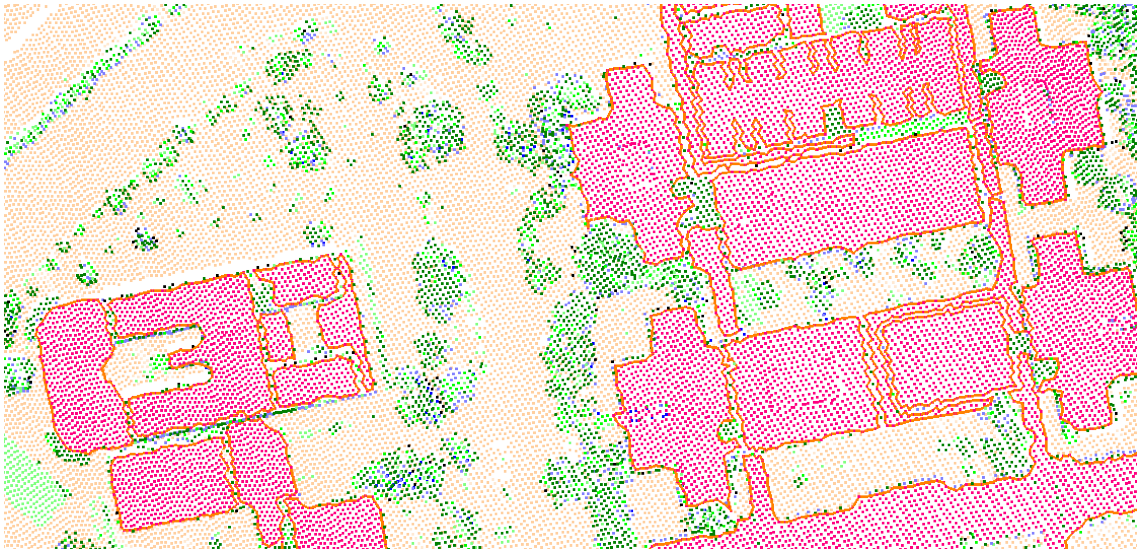


Figura 235: Límites de los puntos clasificados como edificación.

Además de la posición planimétrica de los puntos, se podría considerar un parámetro adicional que indicara la diferencia de altura máxima que puede haber entre dos puntos clasificados para que formen el límite. Este parámetro permitirá diferenciar plataformas anexas pero ubicadas a alturas diferentes, como puede ser el caso de las diferentes plantas de un edificio.

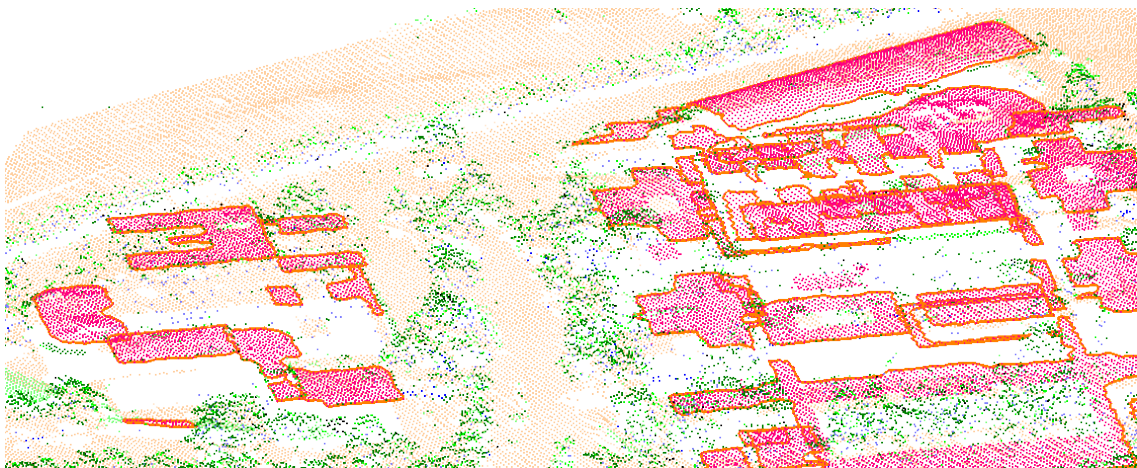


Figura 236: Vista donde se pueden apreciar las diferentes alturas de los límites generados.

## 5.6. Integración de información multiespectral

### 5.6.1. Introducción

Como se ha visto, incluir información multiespectral adicional, capturada por medio de otros sensores, mejora el resultado del proceso de edición. Además permitirá la identificación de los objetos medidos mediante el sistema LiDAR. Este tipo de información rara vez viene incluida en los datos LiDAR, excepto en los equipos más modernos. Por tanto, sería adecuado facilitar herramientas que permitan fusionar ambas fuentes de datos.

Se han contemplado los siguientes supuestos, en función de los datos que se disponen de la imagen del objeto:

- Imagen cónica, sin parámetros de orientación interna ni externa.
- Imagen cónica, con parámetros de orientación interna y externa.
- Imagen en proyección ortogonal, es decir, una ortofotografía.

Por cada uno de estos supuestos, se ha desarrollado un algoritmo que permite extraer la información e incorporarla a la información geométrica. Habría que resaltar que la información raster de la imagen puede estar almacenada en diversos formatos contemplados por la herramienta planteada: BMP, TIFF o JPEG. Una vez realizada la fusión, los datos multiespectrales podrán almacenarse en el fichero de formato estándar LAS, puesto que tienen reservado espacio en su estructura.

### 5.6.2. Imagen cónica, sin parámetros de orientación interna ni externa

Al contrario que en proyectos ALS, cuando se registra en objeto cercano no se suelen utilizar cámaras métricas con la orientación interna conocida. Por el contrario, se utilizan cámaras de medio formato pero sin calibración conocida (Jáuregui, et al., 2009). Por ello, es necesario un método que permita fusionar con precisión los datos adquiridos por el escáner y por la cámara. Uno de los modelos matemáticos utilizados en fotogrametría, que sigue las reglas de la geometría proyectiva, es el llamado DLT (*Direct Linear Transformation*).

Según la geometría proyectiva, se podría relacionar las coordenadas de dos sistemas similares de la forma:

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{m} R^T \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}$$

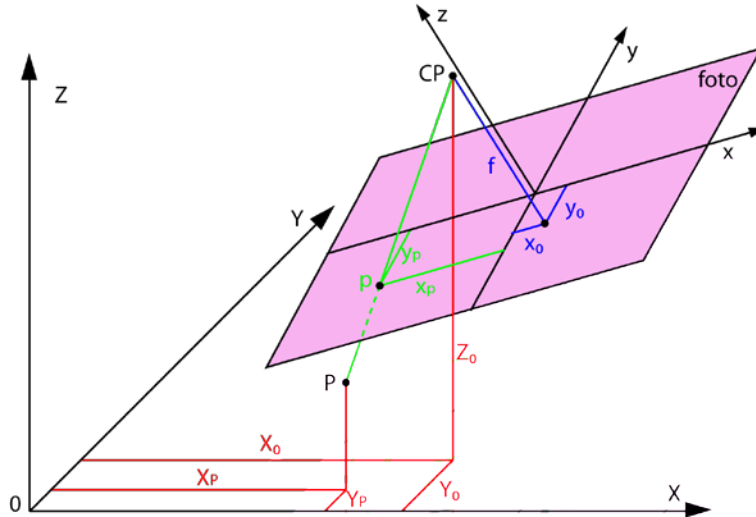


Figura 237: Relación entre un sistema de coordenadas externo, el sistema de coordenadas de la fotografía y las coordenadas de un punto registrado en ésta.

Donde  $R$  representa la matriz de rotación que transforma ambos sistemas de coordenadas y  $m$  representa el factor de escala. Teniendo en cuenta que la distancia del centro de proyección del sistema foto al plano de la foto es la distancia focal  $f$ , se puede expresar la relación anterior como:

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{pmatrix} = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) \\ r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) \\ r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) \end{pmatrix}$$

Dividiendo las dos primeras filas por la tercera, se obtendrían las ecuaciones de colinealidad que relacionan un punto en la foto con sus coordenadas terreno:

$$x = x_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = y_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Para simplificar el sistema se realiza la siguiente sustitución de variables:

$$\begin{aligned} \bar{a}_1 &= x_0 r_{13} - f r_{11} & a_1 &= \bar{a}_1 / \bar{c}_4 \\ \bar{a}_2 &= x_0 r_{23} - f r_{21} & a_2 &= \bar{a}_2 / \bar{c}_4 \\ \vdots & & y & \\ \bar{c}_3 &= r_{33} & \vdots & \\ \bar{c}_4 &= r_{13} X_0 - r_{23} Y_0 - r_{33} Z_0 & c_3 &= \bar{c}_3 / \bar{c}_4 \end{aligned}$$

Se obtienen las fórmulas que relacionan ambos conjuntos de coordenadas con once incógnitas:

$$x = \frac{a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4}{c_1X + c_2Y + c_3Z + 1} \quad y = \frac{b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4}{c_1X + c_2Y + c_3Z + 1}$$

Por otro lado, habrá que tener en cuenta que las coordenadas medidas en la foto tendrán un determinado error respecto de las coordenadas reales:

$$x = \bar{x} + v_x \quad y = \bar{y} + v_y$$

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores y reordenándolas, se obtienen las ecuaciones lineales que relacionan las coordenadas:

$$\begin{aligned} \bar{x} + v_x &= a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4 - c_1xX - c_2xY - c_3xZ \\ \bar{y} + v_y &= b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4 - c_1yX - c_2yY - c_3yZ \end{aligned}$$

De esta forma, se puede establecer un sistema, que precisaría de al menos seis puntos (que generan doce ecuaciones) medidos en ambos sistemas, para resolver por mínimos cuadrados las once incógnitas minimizando el residuo de las coordenadas medidas. Además, se podrían introducir parámetros de distorsión de las lentes y otros errores sistemáticos para su modelado (Kraus, 1997). El cálculo por MM.CC. permitirá, además, conocer la precisión de las medidas e incluso la detección de errores groseros que permitirá eliminar alguno de los puntos medidos. Para ello se recomienda que el número de puntos medidos sea elevado, al menos doce.

Existe una falta de correspondencia entre las once incógnitas de este sistema y las nueve incógnitas que tiene una proyección central o cónica para determinar los parámetros de la orientación interna y externa. Esto es debido a que se está introduciendo la diferencia de escalas entre el eje x e y de la foto y la falta de ortogonalidad entre ambos ejes. Es decir, se asemeja a una transformación afín del sistema foto antes de entrar en las ecuaciones de la proyección central.

Las ventajas de la DLT residen en la linealidad de estas fórmulas para relacionar las coordenadas en ambos sistemas. Además, la posición del sistema de coordenadas imagen es arbitrario, por lo que no se necesitan marcas fiduciales en los márgenes de la imagen. Incluso, no es necesario conocer el valor de la distancia focal. Con estas características, se convierte en el método de cálculo adecuado cuando no se conoce la orientación interna de una cámara, por ejemplo, en el caso de cámaras no métricas. Por ello, se puede hacer el registro del objeto utilizando un sensor láser y realizar instantáneas con una cámara réflex convencional, fusionando posteriormente los datos.

A pesar de todo, la DLT también tiene importantes desventajas. Por ejemplo, aunque se conozcan algunos parámetros internos de la cámara, se necesitan muchos puntos de control, más que la solución aportada por una proyección central. La excesiva cantidad de puntos puede provocar pérdida de precisión en el cálculo de los parámetros. Además, estos puntos de control deberían estar situados en planos diferentes, ya que los once parámetros de la DLT no son independientes entre sí. Esto provoca que prácticamente no se pueda

utilizar la DLT para resolver la orientación de imágenes aéreas, a no ser que existieran edificios altos, mucho relieve en la zona o que la altura de vuelo fuera baja.

El proceso operativo para llevar a cabo este cálculo consiste en la medición de puntos homólogos en la imagen y en la nube de puntos LiDAR. Para ello, se ha diseñado una herramienta que permite, gráficamente, seleccionar los detalles mejor definidos para llevar a cabo esta operación. El resultado final es la orientación externa de la imagen que permita fusionar los datos. Esta fusión podrá ser temporal, mostrando la nube de puntos proyectada sobre la imagen para poder digitalizar detalles que se aprecian en la fotografía y no son destacables en la nube de puntos LiDAR. O para incorporar información multiespectral a los puntos LiDAR.

Además, otras dos utilidades añadidas a este cálculo de la orientación es la posibilidad de calcular la ortofoto o la superposición como tapiz al modelo digital generado con la nube de puntos para realizar presentaciones gráficas.

Con la resolución del sistema se obtiene el valor de los parámetros que deberían dar lugar a los parámetros de orientación de la imagen, al resolver las fórmulas siguientes:

$$\begin{aligned}
 a &= \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} & b &= \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} & c &= \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ 1 \end{pmatrix} & X &= \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \\
 x_0 &= \frac{a^T c}{c^T c} & y_0 &= \frac{b^T c}{c^T c} & f^2 &= \frac{a^T a}{c^T c} - \left( \frac{a^T c}{c^T c} \right)^2 & p &= \sqrt{c^T c} \\
 d &= \frac{(a^T b)(c^T c) - (a^T c)(b^T c)}{(a^T a)(c^T c) - (a^T c)^2} & m &= -\frac{\det[a \cdot b \cdot c]}{p^3 f^2} \\
 R &= \frac{1}{p \cdot m \cdot f} \begin{pmatrix} m & 0 & -mx_0 \\ -d & 1 & x_0 d - my_0 \\ 0 & 0 & -mc \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} & X &= (a \quad b \quad c)^{-T} \begin{pmatrix} -a_4 \\ -b_4 \\ -1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Los resultados de un ejemplo de DLT se pueden consultar en el apartado 7.1.4.

### 5.6.3. Imagen cónica, con parámetros de orientación interna y externa

Cuando se dispone de un proyecto aéreo, las imágenes tomadas desde el avión son, mayormente, métricas de gran formato, aunque también pueden utilizarse cámaras de medio formato rígidamente unidas al sistema LiDAR. Estas imágenes tienen condiciones rigurosas de toma por lo que llevan incorporados giroestabilizadores y, la mayoría de las veces, un sistema de posicionamiento GNSS/INS. Este sistema de posicionamiento proporcionará la posición y los ángulos de giro que tenía en el momento de la toma.

A pesar de ello, en la mayoría de los proyectos aéreos con imágenes se suele realizar una aerotriangulación que afinará los valores obtenidos por el sistema de posicionamiento, ajustándose incluso a un conjunto de puntos de control tomados en campo.

Como resumen se puede asegurar que cuando se utilizan este tipo de imágenes se define un archivo con la orientación interna y externa de la imagen. Por tanto, se puede utilizar este archivo para poder realizar la fusión entre los datos LiDAR y la información multispectral. En este archivo se debe dar toda la información para poder realizar la fusión. La información que debería contener este archivo podría ser: la matriz de giros, las coordenadas terreno del centro de proyección, el tamaño del píxel, las coordenadas píxel del punto principal y la distancia focal.

Para poder asignar el color a los puntos LiDAR se utilizarían las ecuaciones de colinealidad del apartado anterior. En el apartado 7.1.2, se ha realizado una prueba con imágenes aéreas y su fusión con datos LiDAR.

#### 5.6.4. Imagen en proyección ortogonal

El caso más sencillo de integración de datos multispectrales y datos LiDAR se da en el caso de disponer de una ortofotografía. Este tipo de imágenes han sido calculadas corrigiendo las deformaciones debidas a la perspectiva y al relieve del objeto. El sistema de proyección utilizado, como su propio nombre indica, es ortogonal y están georreferenciadas según un determinado sistema de coordenadas. Este sistema de coordenadas suele ser el mismo que el utilizado para el resto de cartografía, de tal forma que pueden ser integradas en un sistema de información geográfica y mostrarse conjuntamente con información vectorial. Normalmente, los ejes de la imagen coinciden con los ejes XY de la cartografía, aunque, en algunos proyectos sobre todo corredores para trazados, las imágenes podrían estar rotadas.

La georreferenciación de la imagen puede estar almacenada de dos formas diferentes. Una, es mediante un archivo GeoTIFF que son archivos TIFF en los que se han añadido etiquetas de georreferenciación en su cabecera. Estas etiquetas dan información acerca del sistema de referencia, proyección, origen de altitudes, puntos de control, coordenadas, etc. Es decir, los metadatos de la imagen. De hecho, este tipo de archivos también se utiliza para almacenar modelos digitales basados en rejilla. La segunda forma es mediante un archivo externa de georreferenciación, cuyo formato es variado y depende de la aplicación que calculó la ortofoto. No obstante, suelen tener unos campos fijos como son las coordenadas terreno de alguna de las esquinas de la imagen y el tamaño XY de un píxel.

En este caso, la extracción de la información multispectral para ser incorporada a la nube de puntos LiDAR es inmediata, ya que tanto la nube como la imagen se encuentran en la misma proyección y sistema de referencia.



### 5.6.5. Gestión del color

Existen diversas formas de expresar un color que dependerán del dispositivo utilizado para representarlo. Así por ejemplo, los sistemas de impresión utilizan la terna CMY (*Cyan, Magenta, Yellow*) o su variante incluyendo negro CMYK. Sin embargo, los sistemas basados en proyección de luz utilizan la terna RGB (*Red Green Blue*) mediante la fusión de fuentes de luz proyectando en la parte del espectro correspondiente al rojo, verde y azul. Asimismo, el almacenamiento de una imagen digital respondería a estas diferentes maneras de representar un color, aunque la gran mayoría suele utilizar el formato RGB, al cual, a veces, se le añade la componente alfa (RGBA) que indica la transparencia de un determinado píxel. Estructuralmente, estas componentes pueden almacenarse utilizando 1, 3 ó 4 bytes.

Debido a la terna de coordenadas que se utilizan, un color podría representarse por su posición en un cubo con los colores en las esquinas opuestas. Esta representación permitiría calcular la similitud entre dos colores en función de la distancia que tienen en el cubo.

Sin embargo, existen sistemas de representación de colores más adecuados e intuitivos que este cubo y que están basados en una representación cilíndrica. Los más utilizados son HSL (*Hue Saturation Lightness*, es decir, Tono Saturación Luminosidad) y HSV (*Hue Saturation Value*, es decir, Tono Saturación Valor). El tono es similar al color que se percibe: rojo, naranja, azul, etc. La saturación es la pureza o intensidad de un color. La luminosidad o el valor es la cantidad de brillo o de luz de un color. En el modelo HSL, se puede utilizar la Intensidad en vez de la Luminosidad, generando el sistema HSI.

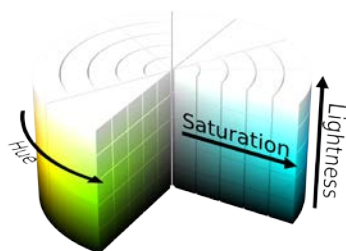


Figura 240: Representación HSL.

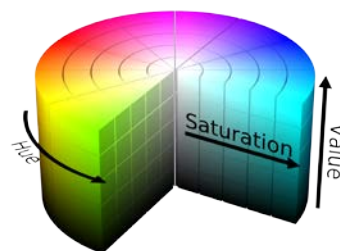


Figura 241: Representación HSV.

En ambas representaciones, el tono está distribuido angularmente y la saturación es el radio del cilindro. Verticalmente se distribuye, en uno, la luminosidad y, en el otro, el valor. Debido a que la saturación puede tener conflictos con el concepto de pureza de un color cuando tiene mucha o poca luminosidad, existe una variante de estos métodos que utiliza la variable croma en lugar de saturación, dando lugar a figuras de cono o doble cono.

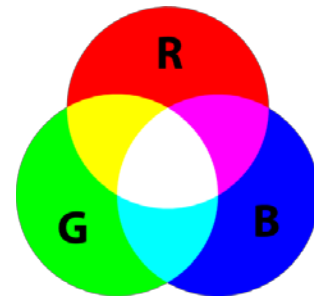


Figura 238: Composición aditiva.

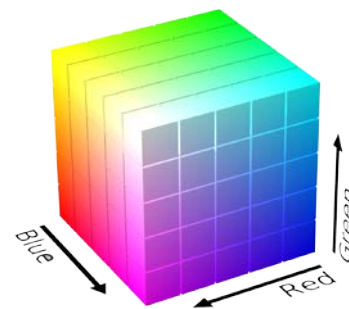


Figura 239: Cubo RGB.



Figura 242: Representación HSL con croma.

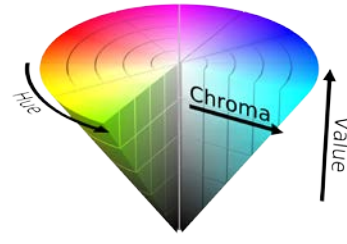


Figura 243: Representación HSV con croma.

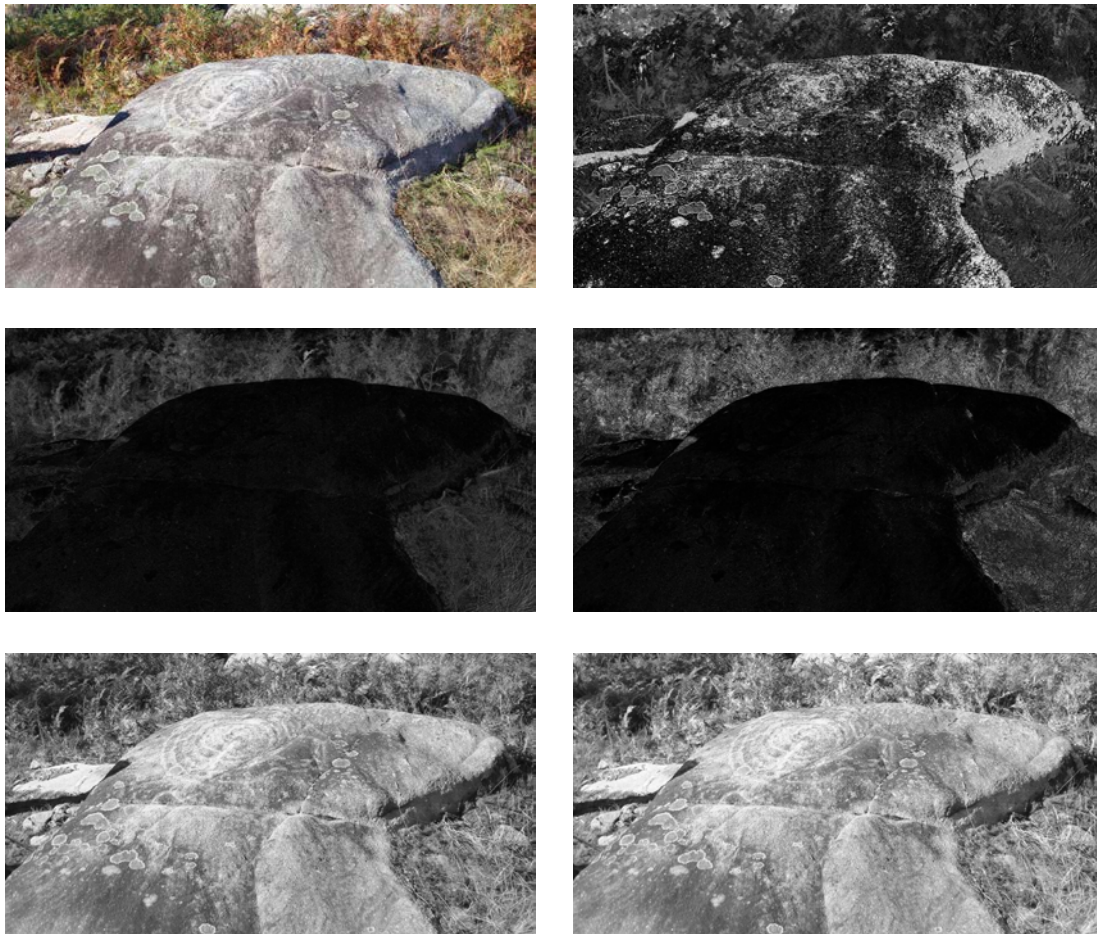
La variable croma se define como la cantidad de tono que tiene un color (es decir, su diferencia respecto del gris) en función del brillo del color blanco bajo las mismas condiciones. Por otro lado, la saturación es la cantidad de tono de un color en función de su propio brillo. Para la definición de estos términos ha sido necesaria la introducción del término brillo que se define como la cantidad de luz. Este término permite también definir la luminosidad como la cantidad de brillo de un tono en función del brillo del color blanco bajo las mismas condiciones (Fairchild, 2004).

Por tanto, las operaciones realizadas utilizando el color se realizarán utilizando alguna de estas dos formas (HSL o HSV). Sin embargo, se necesitarán las correspondientes fórmulas de transformación de un sistema a otro. Teniendo en cuenta que la mayoría de las imágenes están almacenadas utilizando el formato RGB, se necesitarán las fórmulas para pasar de estas coordenadas a HSL o HSV.

Llamando  $H$  al valor,  $C$  al índice croma,  $I$  a la intensidad,  $L$  a la luminosidad,  $V$  al valor y  $S$  a la saturación, se tienen las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned}
 M &= \max(R, G, B) & m &= \min(R, G, B) \\
 \alpha &= \frac{2R - G - B}{2} & H &= \arctan \frac{\beta}{\alpha} \\
 \beta &= \frac{\sqrt{3}(G - B)}{2} & C &= \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \\
 I &= \frac{R + G + B}{3} \\
 V &= M \\
 L &= \frac{M + m}{2} \\
 S_{HSV} &= \begin{cases} 0 & \text{si } C = 0 \\ \frac{C}{V} & \text{si } C \neq 0 \end{cases} & S_{HSL} &= \begin{cases} 0 & \text{si } C = 0 \\ \frac{C}{1 - |2L - 1|} & \text{si } C \neq 0 \end{cases} & S_{HSI} &= \begin{cases} 0 & \text{si } C = 0 \\ 1 - \frac{m}{I} & \text{si } C \neq 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Tabla 20: Ejemplo de imágenes utilizando diversas variables en valores de gris. De izquierda a derecha y de arriba abajo, RGB, tono, índice croma, saturación, intensidad y valor.



Como se puede observar, existen múltiples términos para caracterizar un color, aunque los fundamentales son el brillo y la cantidad de tono, necesarios para derivar el resto de parámetros. En general, los atributos más adecuados para determinar un color son tono, luminosidad y la variable croma. La saturación es normalmente redundante (Fairchild, 2004).

## 5.7. Obtención de datos derivados

### 5.7.1. Introducción

A partir de una nube de puntos clasificada y filtrada es posible calcular modelos digitales del terreno o de superficies, eligiendo el tipo de objetos que pueden formar dichos modelos. Estos modelos pueden utilizarse para extraer diversos resultados o datos interesantes para la documentación y representación del objeto medido. Estos resultados pueden ser mapas de representación del relieve (curvados, tintas hipsométricas, sombreados, etc.), ortorrectificación de fotografías o cálculos de cubicaciones (Zhang, et al., 2005).

Por otro lado, la nube de puntos registrada por los dispositivos láser es tan densa que podría utilizarse directamente como modelo para calcular estos resultados. Esto supondría un ahorro de tiempo y espacio en disco, ya que no sería necesario calcular un modelo digital con las relaciones espaciales entre los puntos. De hecho, a continuación, se propone un algoritmo que no precisa el cálculo de este modelo digital, utilizando directamente la nube de puntos para extraer las curvas de nivel.

Seguidamente, se expone el proceso de cálculo de la ortofotografía aérea a partir de datos LiDAR, haciendo hincapié en las peculiaridades que presentan las nubes de puntos así registradas. Con ello, se pretende exponer el procedimiento correcto para calcular una ortofotografía verdadera (*true-orto*) con la mayor veracidad posible.

### 5.7.2. Mapas de curvas de nivel

Los mapas de curvas de nivel es el formato de representación del relieve más demandado. Se trata de un conjunto de líneas imaginarias que unen puntos de igual cota, separadas una distancia vertical constante denominada “equidistancia”. Estas curvas de nivel se pueden obtener por medio de un modelo digital del terreno, interpolando entre los puntos de los diferentes triángulos o celdas que conforman este. Esto implicaría tener que calcular un modelo digital a partir de los datos originales.

Sin embargo y como se propuso en el apartado 3.3.3.1, la nube de puntos LiDAR tiene una alta densidad más o menos constante por lo que se podría tratar como un modelo digital de datos no estructurados. Las interpolaciones deberían realizarse en el ámbito del punto eligiendo un área de influencia. El tamaño de esta área de influencia es conocido, puesto que aproximadamente se conoce la densidad de registro LiDAR. Por ello, se podrían realizar rápidos cálculos de interpolación de puntos, por ejemplo, la extracción de las curvas de nivel u otros cálculos de mapas de representación raster, como, mapas de tintas hipsométricas, sombreados, pendientes, orientaciones, etc.

El algoritmo propuesto para extraer las curvas de nivel se apoya, básicamente, en el cálculo de los límites de un conjunto de puntos, explicado en el apartado 5.5.

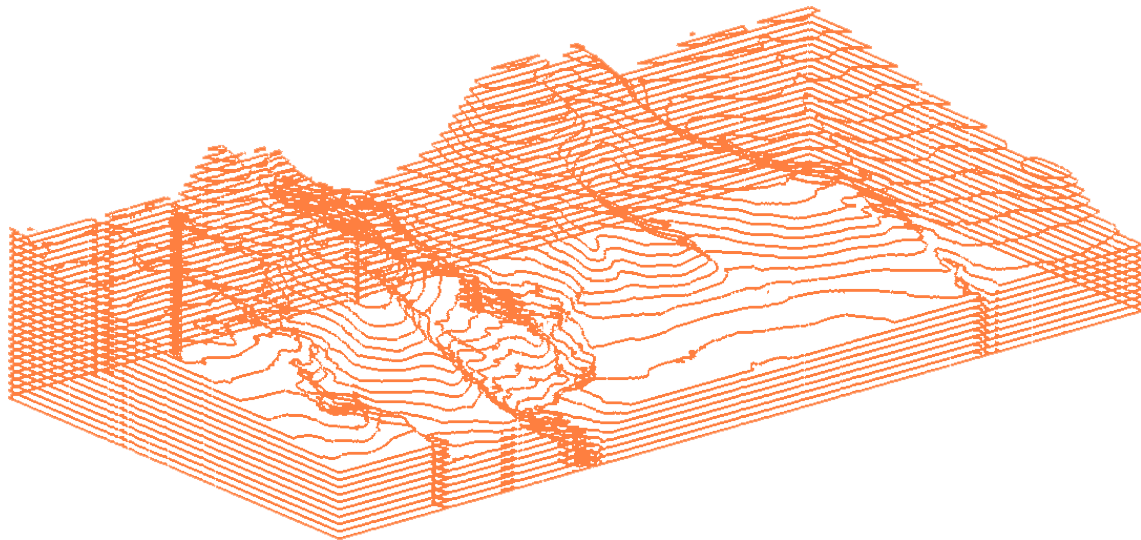


Figura 244: Ejemplo de las curvas de nivel calculadas mediante líneas límite.

### 5.7.3. Ortofotografía

Como se ha explicado en capítulos anteriores, las fotografías no son documentos en los que se puedan realizar medidas pues la escala no se mantiene constante en todos sus puntos, estando afectadas de la geometría del objeto y el punto de vista en el momento de la toma. Sin embargo, el poder comunicador que tiene una fotografía supera en muchos casos a otros tipos de representaciones como los mapas de líneas vectoriales. A través, de la información contenida en una fotografía, se puede interpretar la realidad sin tener que comprender el proceso de abstracción cartográfico. Además, su obtención es más económica y rápida que los mapas vectoriales. Por tanto, sería adecuado poder obtener información como la contenida en una fotografía pero con las características geométricas de un mapa cartográfico.

Una vez se han corregido las distorsiones que tiene la fotografía, se puede integrar en un SIG aportando información multispectral continua del objeto medido. Incluso, esta información, al ser continua, permitirá la digitalización de elementos. Por último, la fotografía se podrá utilizar como textura de modelos digitales que permitirán realizar la recreación digital de la realidad (Habib, 2009).

El cálculo de la ortofoto se realiza a partir de una matriz de puntos en coordenadas terreno que representa la posición de los píxeles de la imagen destino en el plano de rectificación. La densidad de esta matriz, normalmente, es muy superior a la densidad de puntos del modelo digital (6 ó 7 veces) pero igual o inferior a la cantidad de píxeles de la imagen original. Se deberán conocer las coordenadas XYZ de los puntos de la matriz, extraídas a partir de interpolación de un modelo digital de la zona u objeto. En fotogrametría aérea, el plano de rectificación es siempre el plano XY; pero en fotogrametría de objeto cercano, el plano de rectificación puede ser cualquiera definido por el usuario. Por tanto, de forma general, la tercera coordenada almacenada en cada punto de esta matriz



bidimensional será la distancia al objeto medida de forma perpendicular al plano de rectificación.

Para calcular el valor del píxel de cada punto de la matriz se deben transformar sus coordenadas terreno a las coordenadas en el sistema de la fotografía original que se está rectificando. Para ello se pueden emplear las ecuaciones de colinealidad explicadas en el apartado 5.6.2. Las ecuaciones de colinealidad requieren que se conozca tanto la orientación interna como la orientación externa de la fotografía.

$$x = x_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = y_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Esta manera de proceder precisa mucho tiempo de cálculo por lo que existen otras soluciones, menos precisas en sus resultados, que agilizan el proceso; por ejemplo, mediante una transformación bilineal conociendo cuatro puntos de control (Kraus, 2007).

Las ecuaciones anteriores generarán dos valores reales, no enteros, por lo que no coincidirán exactamente con la posición de los píxeles de la imagen original. Al respecto se podrían elegir varias opciones. Primero, elegir el píxel más cercano lo cual es muy rápido pero puede producir desplazamientos en la ortofoto de hasta medio píxel. Segundo, se podría realizar una interpolación bilineal utilizando las cuatro píxeles vecinos alrededor de las coordenadas calculadas. Las fórmulas para un punto  $P$  de coordenadas  $(x, y)$  serían:

$$V_P = \left(1 - \frac{x}{\Delta} - \frac{y}{\Delta} + \frac{xy}{\Delta^2}\right) V_1 + \left(\frac{y}{\Delta} - \frac{xy}{\Delta^2}\right) V_2 + \left(\frac{x}{\Delta} - \frac{xy}{\Delta^2}\right) V_3 + \frac{xy}{\Delta^2} V_4$$

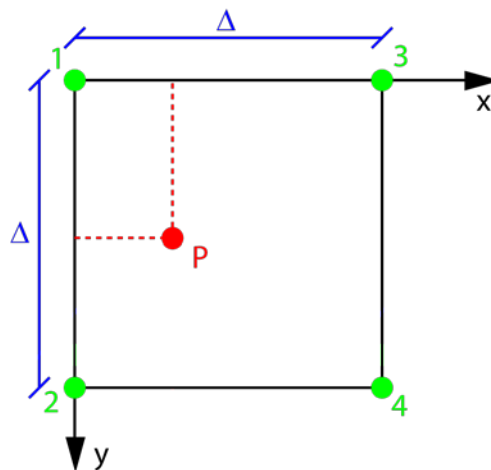


Figura 245: Interpolación bilineal.

De esta forma, no se producen discontinuidades en elementos lineales pero tiene más cálculo y menos contraste en la ortofoto.



Como se ha comentado, para el cálculo de la ortofoto es necesario un modelo digital que permita obtener la tercera coordenada que la fotografía original no ha podido registrar. En fotogrametría aérea, tradicionalmente, el modelo digital utilizado para la rectificación ha sido el MDT, es decir, utilizando aquellos puntos o entidades apoyados sobre el terreno, ignorando objetos con volumen como edificios o árboles. Esto era debido, básicamente, al coste que suponía generar un MDS de precisión, puesto que había que añadir las cubiertas de los edificios restituídas y los pies de estos sobre el terreno.

Sin embargo, si la información de partida es una nube de puntos LiDAR y se ha realizado la correcta clasificación de esta, la generación de MDT y MDS es prácticamente inmediata. Por ello, para la rectificación de la fotografía se utilizará el MDS pudiendo rectificar el abatimiento en los edificios y árboles.

En las siguientes figuras se muestra el error que se comete si se utiliza el MDT para el cálculo o el MDS.

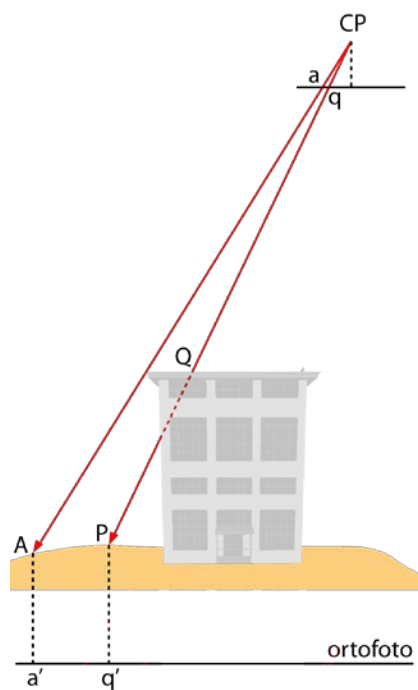


Figura 246: Rectificación a partir de MDT.

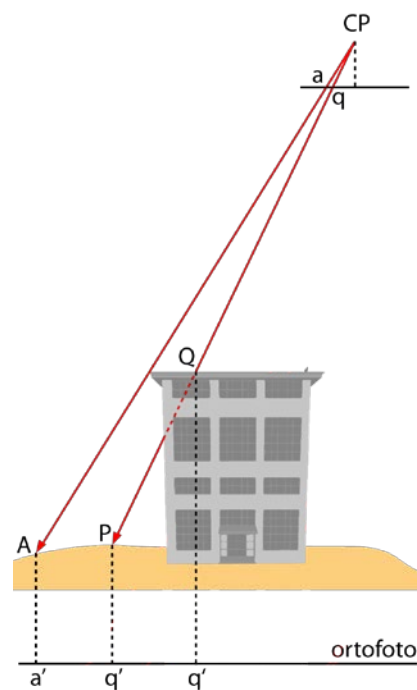


Figura 247: Rectificación a partir de MDS.

Por otro lado, en la figura 247 se observa que dos puntos terreno (P y Q) tienen la misma posición en la imagen original, quedando sólo registrado aquel con mayor cota. Al realizar el cálculo con la rejilla anteriormente comentada, la posición del punto P podría rellenarse con dicho píxel que no corresponde con su valor original. Para evitar esto, se debería utilizar un algoritmo que permita encontrar las intersecciones de los rayos con objetos que han podido generar “sombra” con su abatimiento. De esta forma, se podrían encontrar las zonas de “sombra” y rellenarlas con un valor de píxel con dicho significado, por ejemplo, completamente blanco o negro.

Para el cálculo completo de la ortofoto, se precisaría otra fotografía realizada desde otro punto de vista para poder rellenar dichos píxeles vacíos con el valor que les corresponde. Este proceso generaría lo que se conoce como “true-orto” (figura 248).

Por último, también se podría hacer referencia a la forma de calcular el MDS. La manera más sencilla sería realizando un modelo con los puntos clasificados previamente como terreno desnudo, vegetación y edificación. Sin embargo, en este modelo no se formarían las paredes verticales que realmente tienen los edificios porque se generarían triángulos como resultado de la unión del primer punto registrado de la cubierta y el último punto registrado en el suelo cerca del pie del edificio. Este triángulo no sería vertical porque entre ambos puntos existe un desplazamiento planimétrico, como mínimo la densidad de registro del LiDAR, por ejemplo 30 cm. Hay que tener presente que, en los archivos LiDAR, también existen zonas de sombra provocadas por la altura de determinados objetos sobre el terreno, puesto que el registro también es focal, como se muestra en la figura 249.

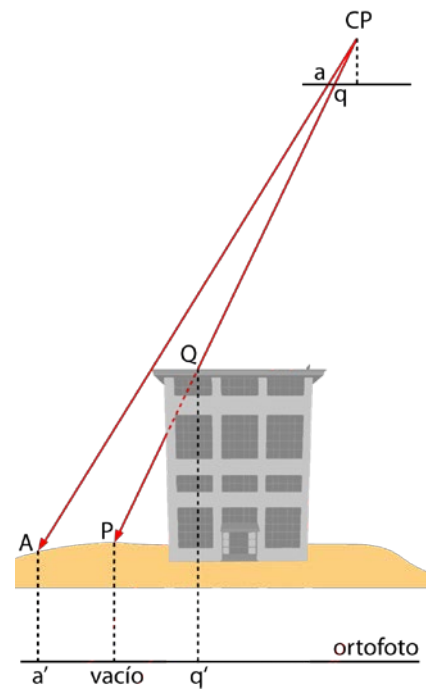


Figura 248: True-orto.

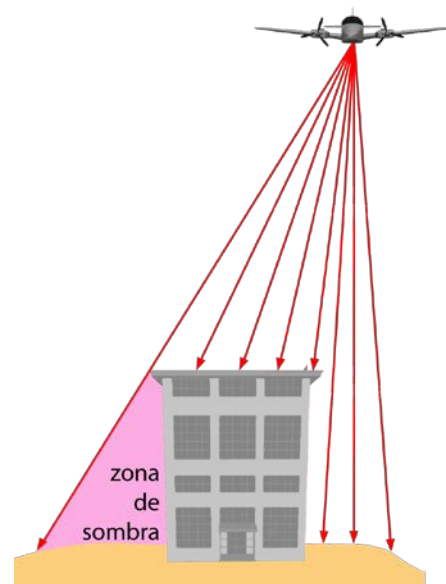


Figura 249: Zona de sombra en el registro LiDAR.

Por ello, se propone una solución consistente en generar un MDT sólo con los puntos terreno e incluir prismas verticales cuya base sea la superficie calculada con los puntos de edificación o de vegetación. Como es obvio, este límite deberá haber sido calculado previamente con el algoritmo presentado en el apartado 5.5. Con ello, se conseguirían paredes completamente verticales, mejorando la precisión en la ortofoto.

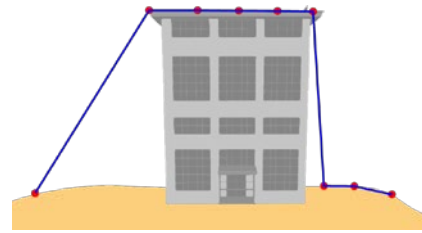


Figura 250: Modelo generado considerando los puntos de suelo y de edificación conjuntamente.

## Capítulo 6

# Definición de la estructura de los modelos

## 6.1. Diagrama de flujo

### 6.1.1. Introducción

En el presente capítulo se va a desglosar cómo se han desarrollado los diferentes algoritmos propuestos en el capítulo 5. Para ello se van a mostrar los diferentes diagramas de flujo del código. Para ello, se van a utilizar las formas estandarizadas para esta clase de gráficos cuyas formas corresponden a diferentes tipos de tareas. A continuación, se muestra una leyenda con dichas formas.

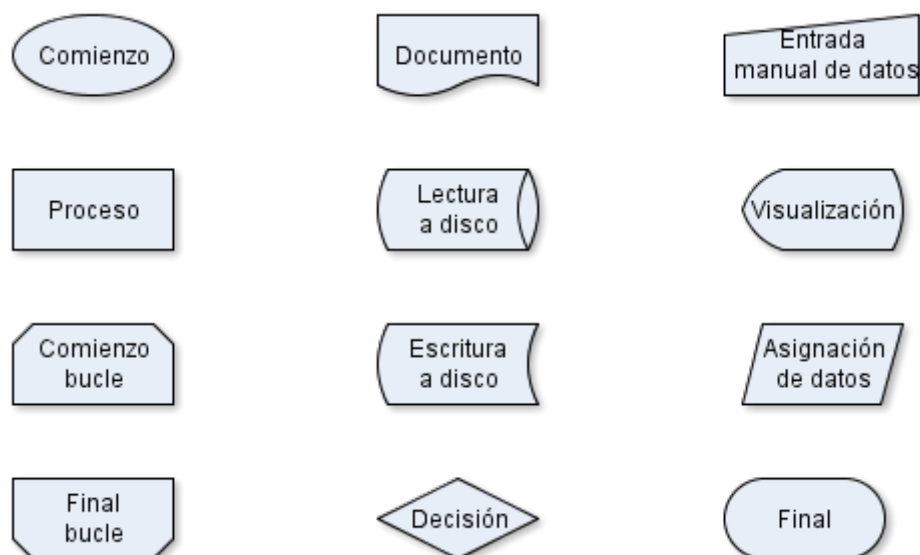


Figura 251: Leyenda de los diagramas de flujo.

Algunos de los algoritmos hacen referencia a otros dentro de su proceso.

### 6.1.2. Triangulación rápida en 2D

La teoría de este algoritmo está expuesta en el apartado 5.2. Se pretende calcular la triangulación de Delaunay de un archivo que almacena puntos, probablemente procedentes de algún tipo de registro mediante técnicas láser aéreas (ALS). El algoritmo utiliza dos hilos de ejecución en el momento central del cálculo, para calcular los triángulos y para ir salvando los diferentes quadrees finalizados a disco. El archivo resultante es una triangulación TIN.

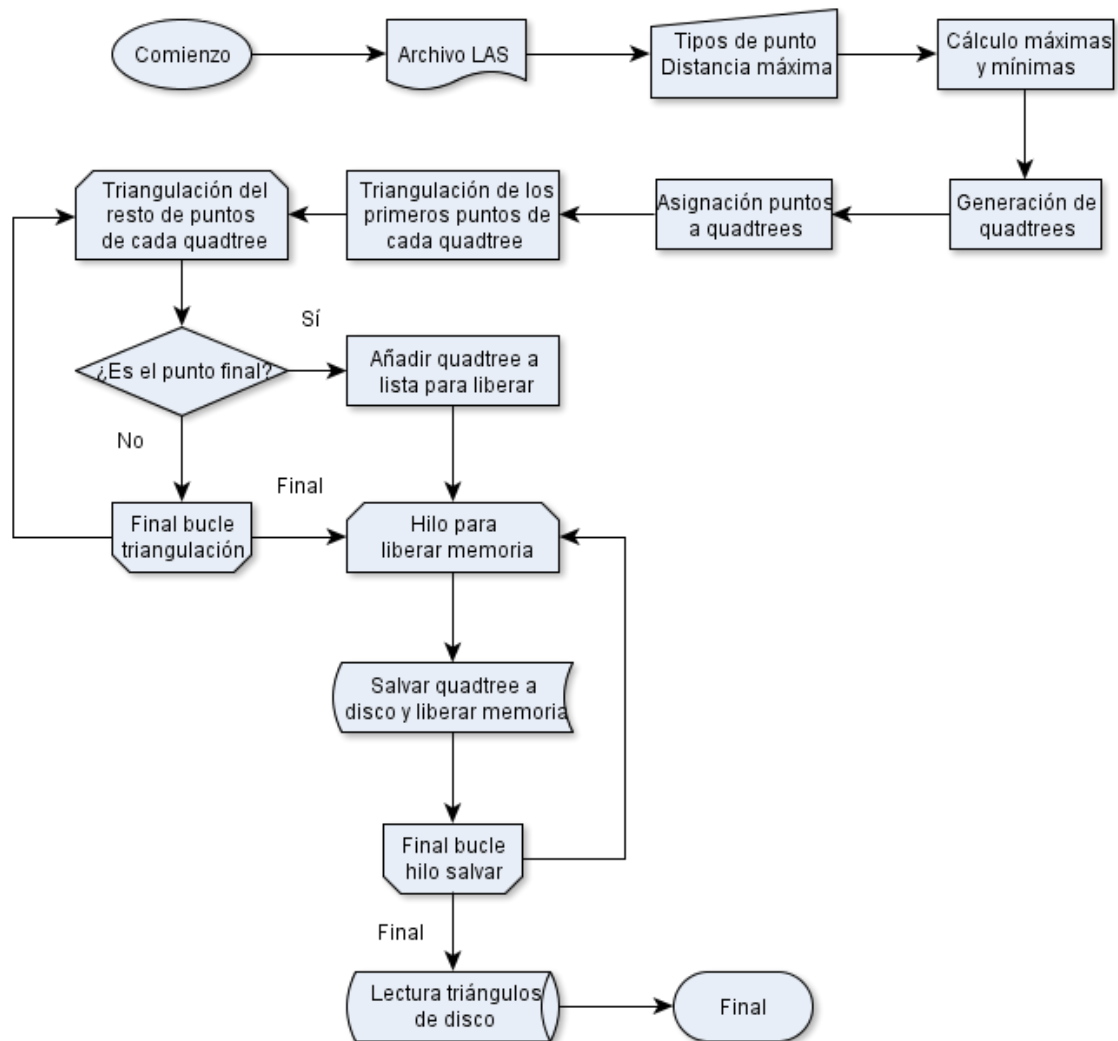


Figura 252: Diagrama de flujo de triangulación rápida en 2D.

En el apartado 6.2.2, se muestra la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

### 6.1.3. Tetraedrización

La teoría de este algoritmo está expuesta en el apartado 5.3. Se pretende calcular la tetraedrización de Delaunay de un archivo que almacena puntos, probablemente procedentes de algún tipo de registro mediante técnicas láser terrestres (TLS). El algoritmo utiliza dos hilos de ejecución en el momento central del cálculo, para calcular los tetraedros y para ir salvando los diferentes octrees finalizados a disco. El archivo resultante es un conjunto de tetraedros pero se necesita presentar la triangulación TIN de las caras externas del objeto.

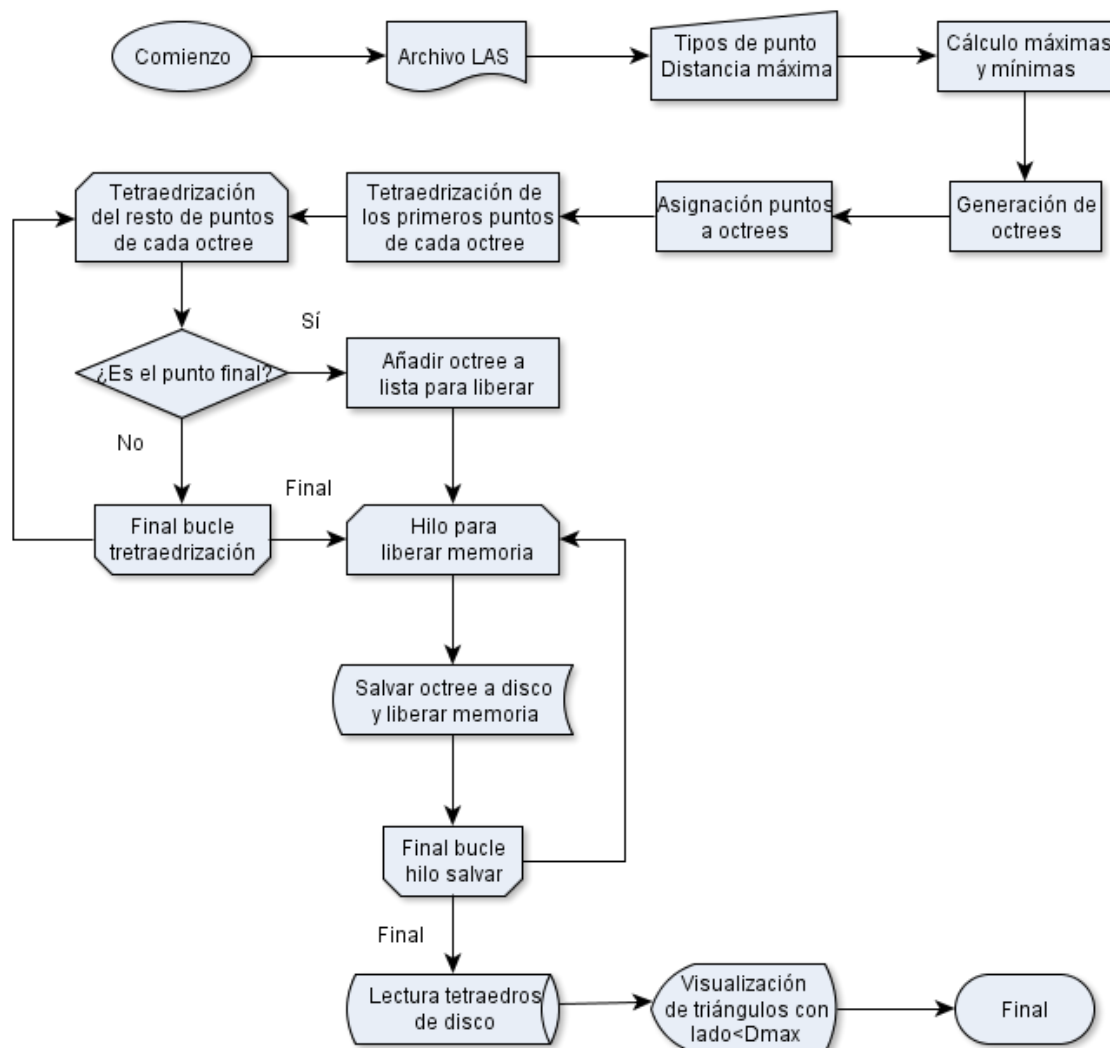


Figura 253: Diagrama de flujo de tetraedrización.

En el apartado 6.2.3 se muestra, la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.



## 6.1.4. Clasificación de puntos láser

### 6.1.4.1. En función de la geometría

La teoría de este algoritmo está expuesta en el apartado 5.4.2. Se pretende clasificar puntos de una nube LiDAR a partir de las relaciones geométricas con su entorno. El algoritmo se basa en la triangulación rápida de Delaunay y, para realizar la clasificación, utiliza tantos hilos de ejecución como núcleos tenga el ordenador. El resultado se almacena directamente en el archivo LAS de entrada.

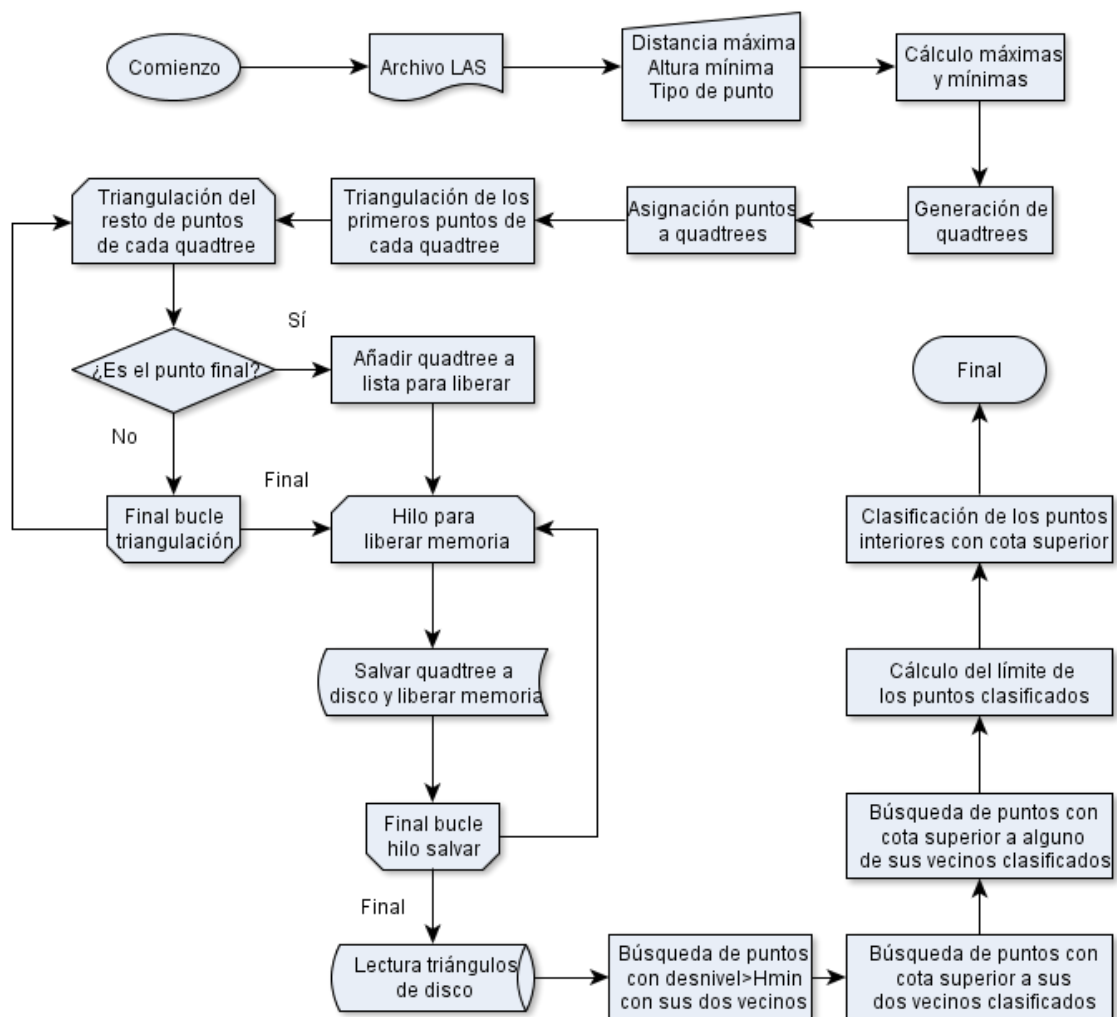


Figura 254: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos en función de la geometría.

En el apartado 6.2.4.1 se muestra, la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

#### 6.1.4.2. En función del orden de registro

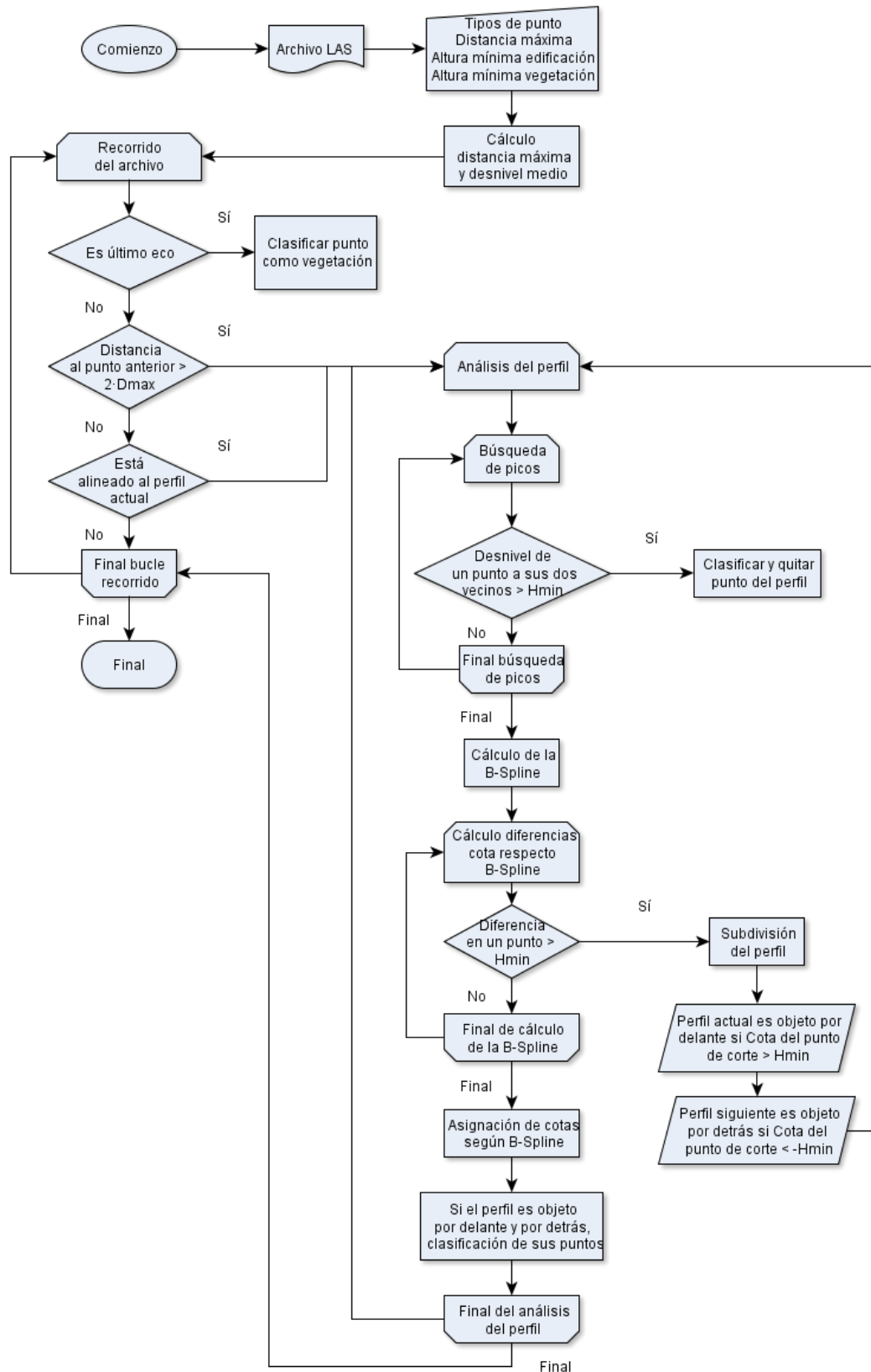


Figura 255: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos en función del orden de registro.

En el apartado 6.2.4.2 se muestra, la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

### 6.1.4.3. En función de la radiometría

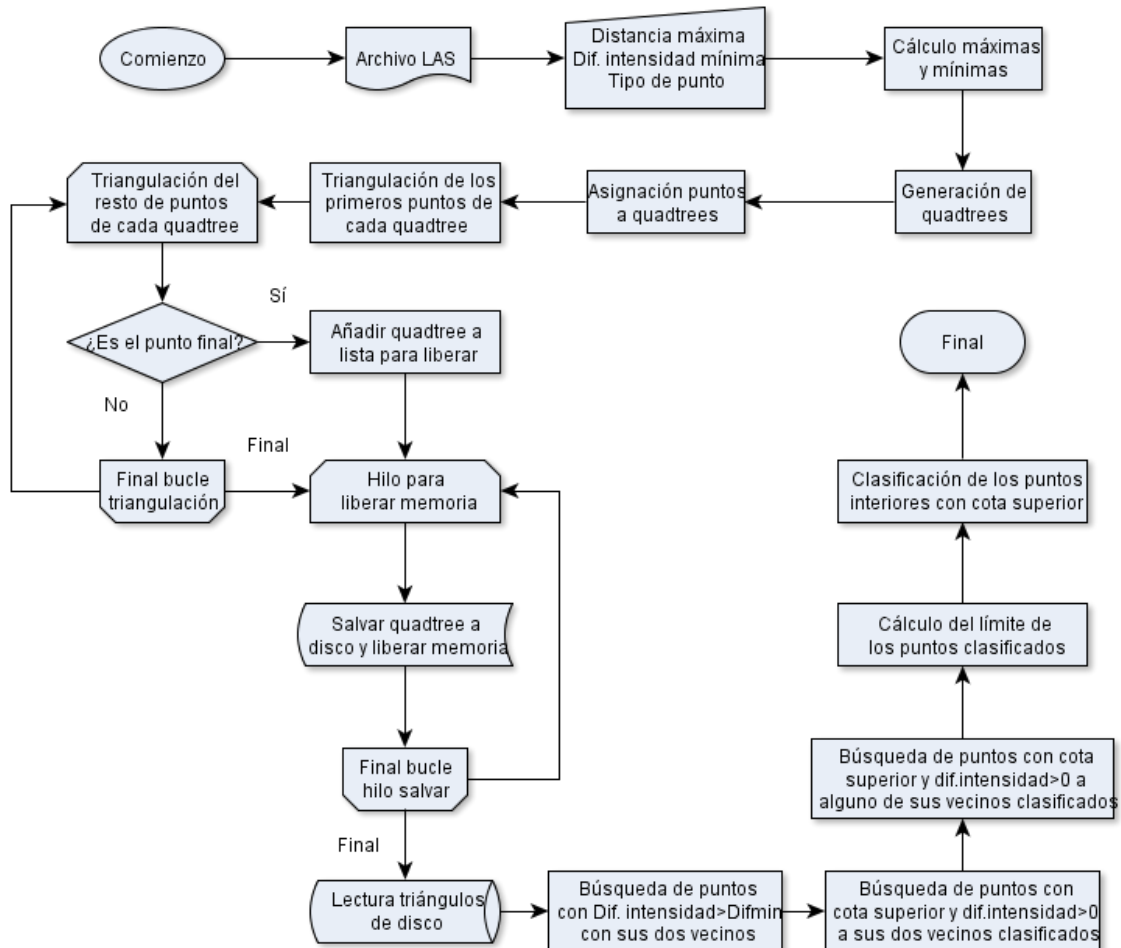


Figura 256: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos en función de la intensidad.

En el apartado 6.2.4.3.b) se muestra, la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

#### 6.1.4.4. En función de la geometría y radiometría

##### a) Información multispectral

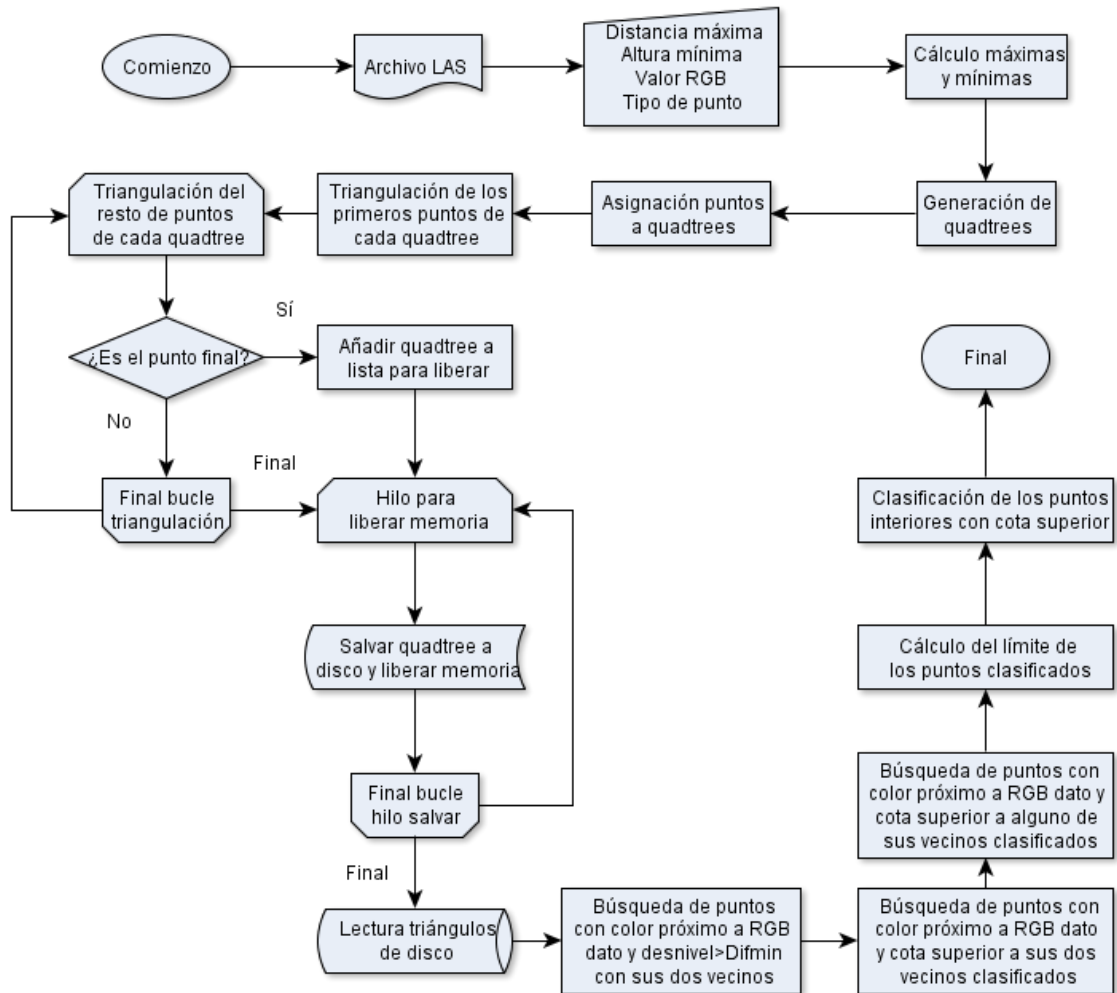


Figura 257: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos en función de la geometría e información multispectral.

En el apartado 6.2.4.4.a), se muestra la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

## b) Información de intensidad

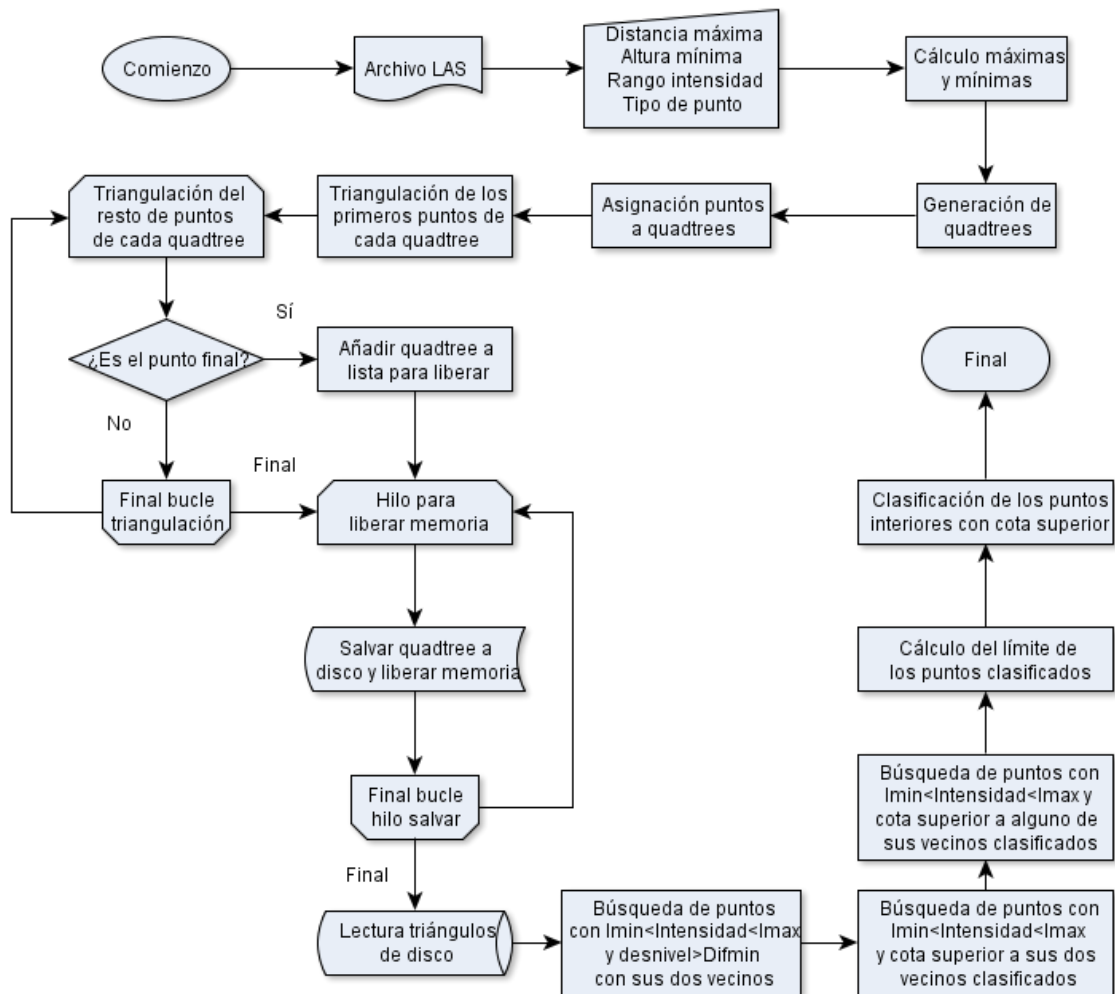


Figura 258: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos en función de la geometría e intensidad.

En el apartado 6.2.4.4.b), se muestra la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

### 6.1.4.5. Detección de puntos erróneos

#### a) Elevados

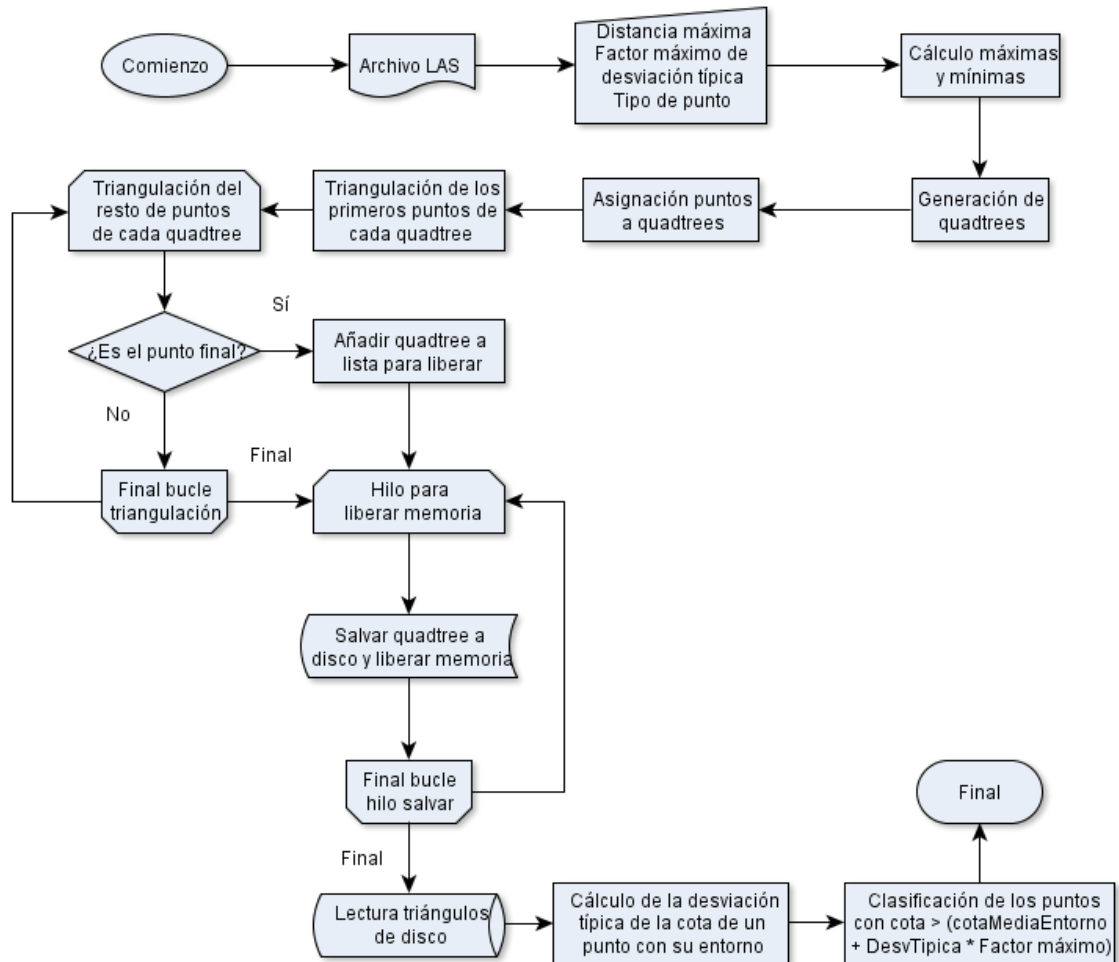


Figura 259: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos elevados.

En el apartado 6.2.4.5.a), se muestra la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.



## b) Hundidos

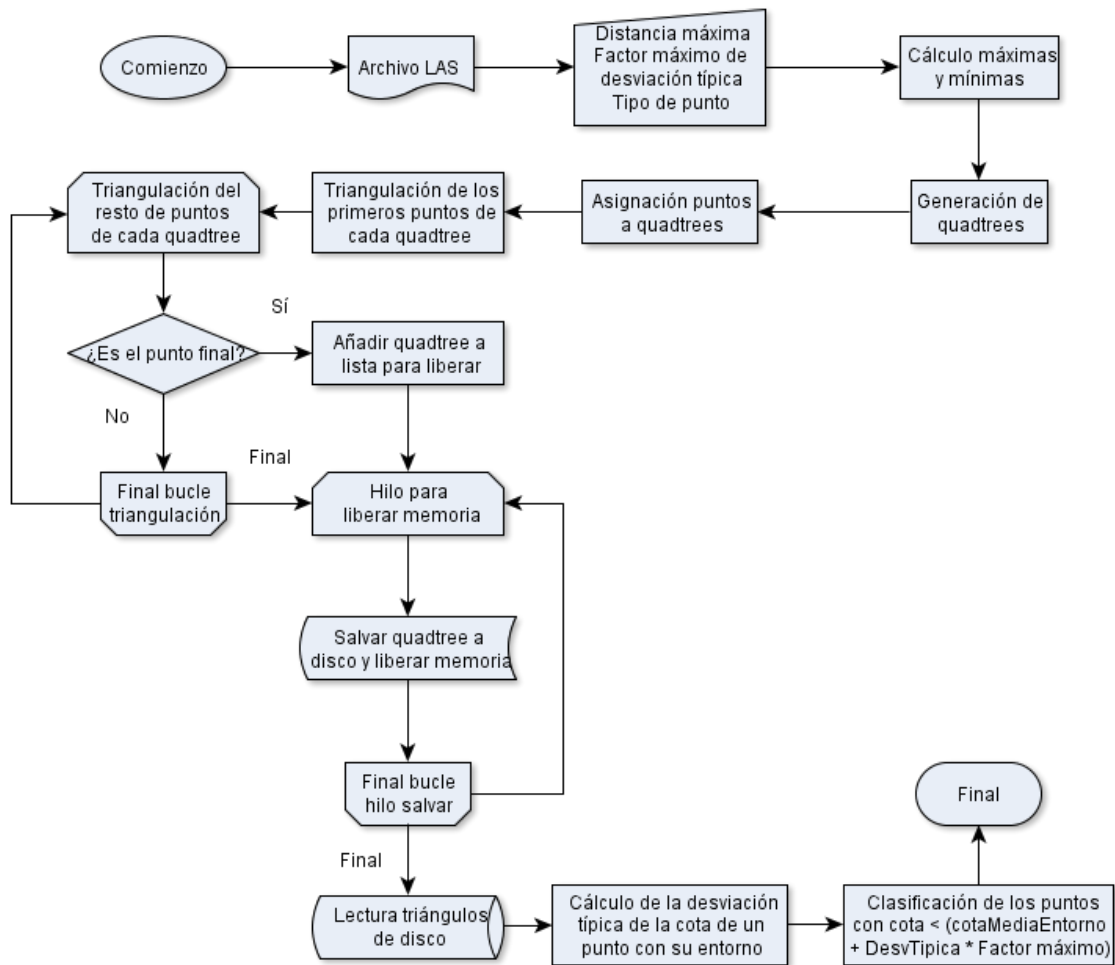


Figura 260: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos hundidos.

En el apartado 6.2.4.5.a), se muestra la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

### c) Aislados

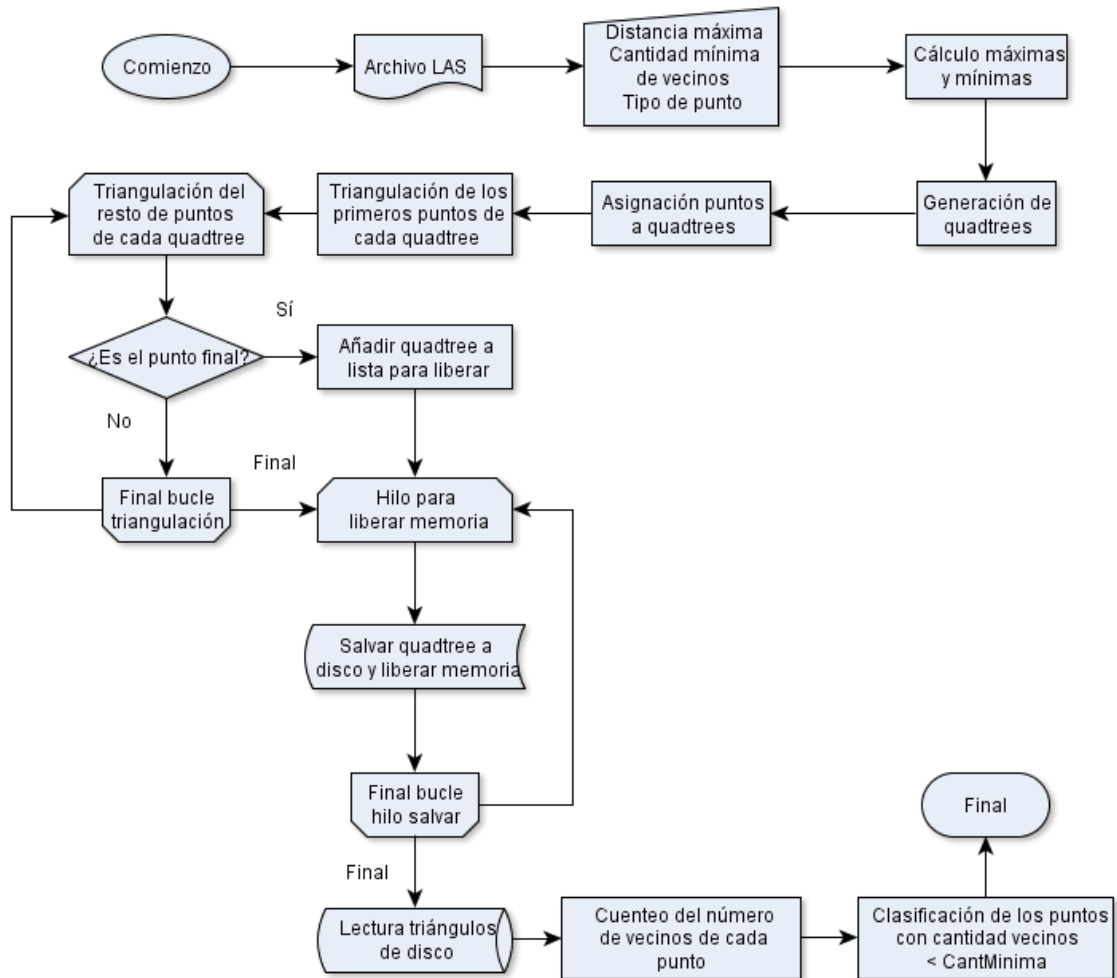


Figura 261: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos aislados.

En el apartado 6.2.4.5.b), se muestra la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

#### 6.1.4.6. Detección automática de puntos pertenecientes a edificaciones

##### a) Fachadas

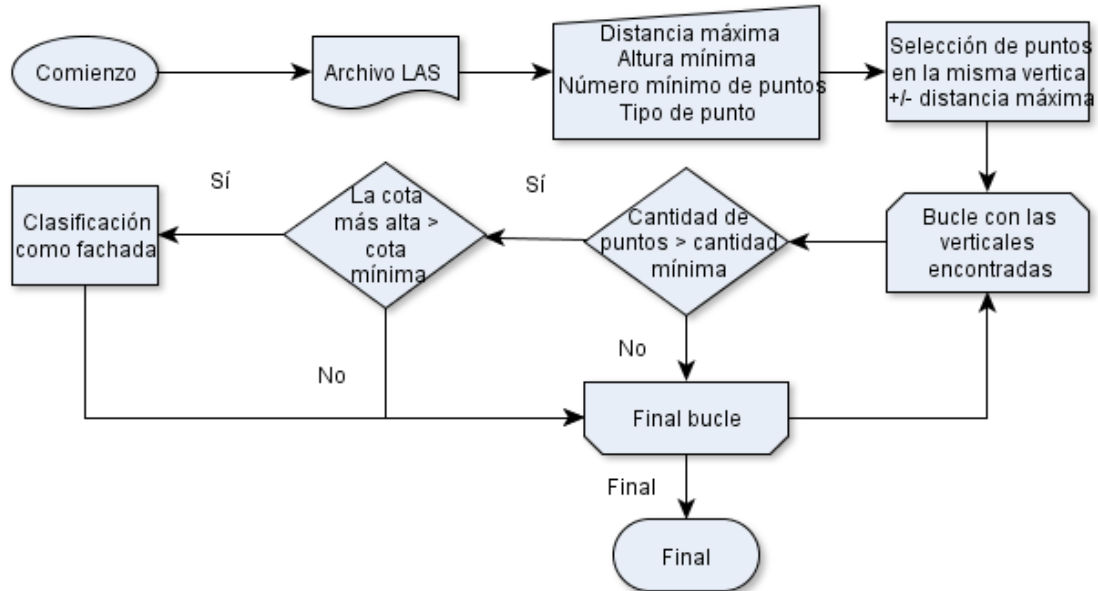


Figura 262: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos de fachadas.

En el apartado 6.2.4.6.a), se muestra la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

## b) Cubiertas

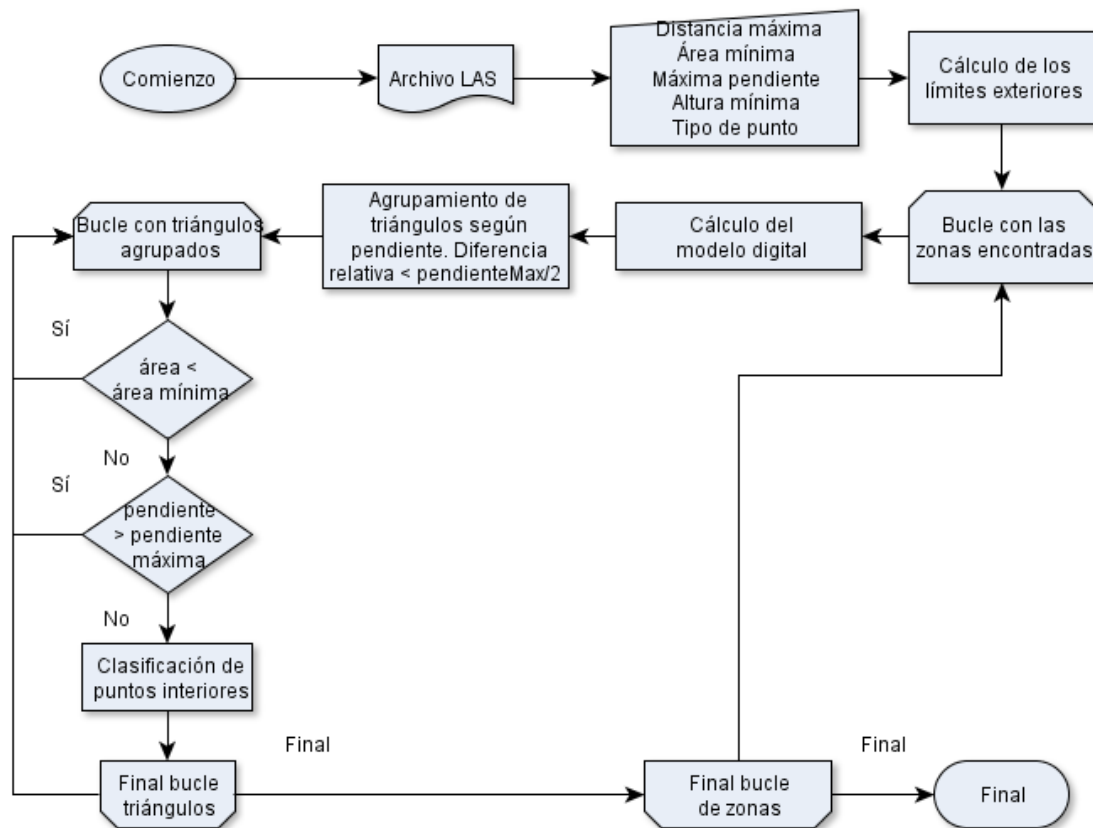


Figura 263: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos de cubiertas.

En el apartado 6.2.4.6.b), se muestra la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

#### 6.1.4.7. Detección en función de la morfología

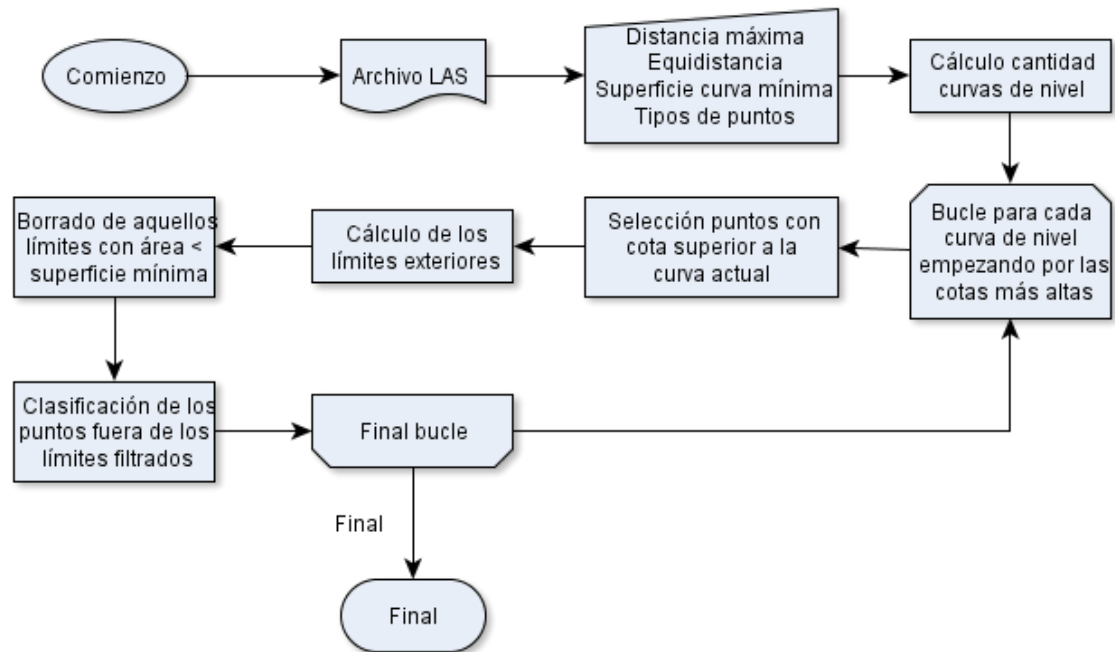


Figura 264: Diagrama de flujo para la clasificación según morfología.

En el apartado 6.2.6.1, se muestra la cabecera de la función en C++, con la explicación de los parámetros de entrada y salida.

#### 6.1.4.8. Superficie mágica

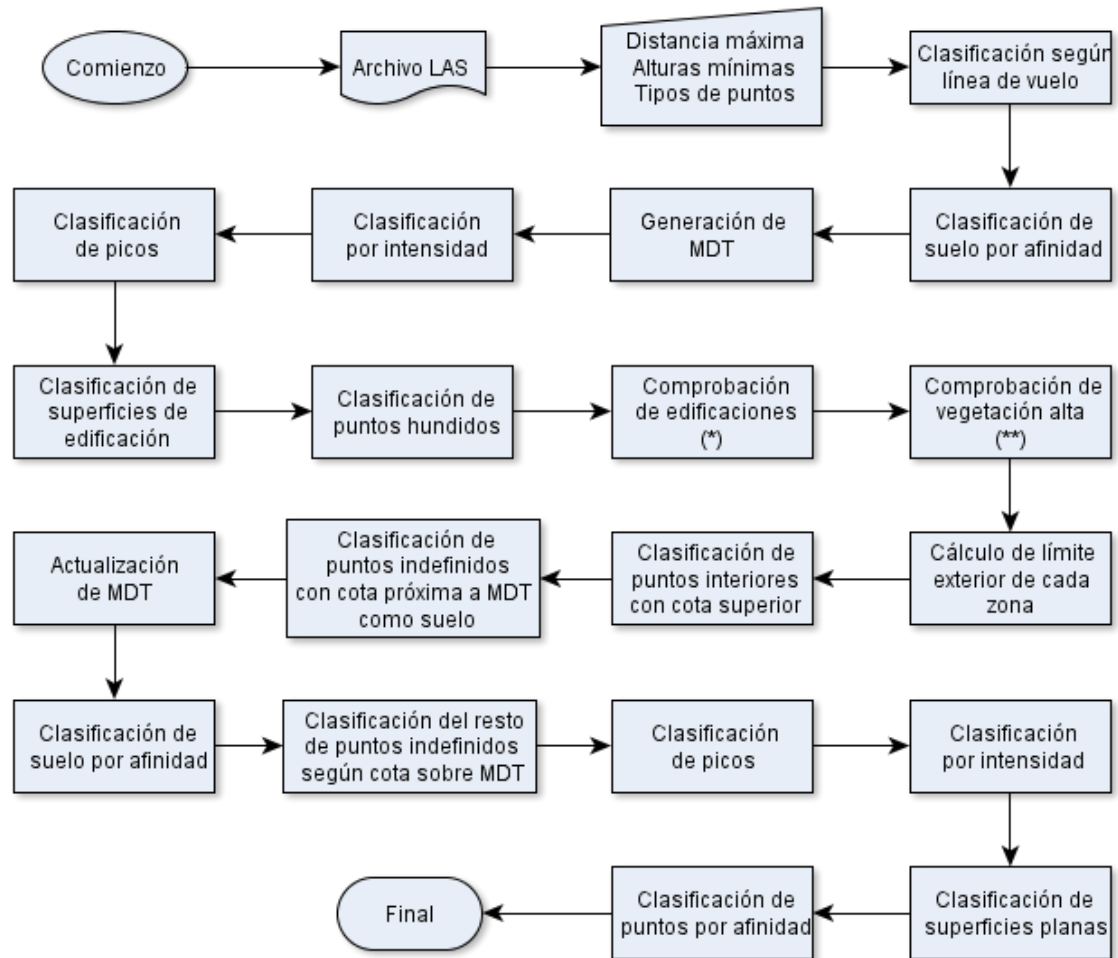


Figura 265: Diagrama de flujo para la clasificación mediante “Superficie mágica”.

Los diagramas de flujo de las tareas “Comprobación de edificaciones” y “Comprobación de vegetación alta” se muestran a continuación.



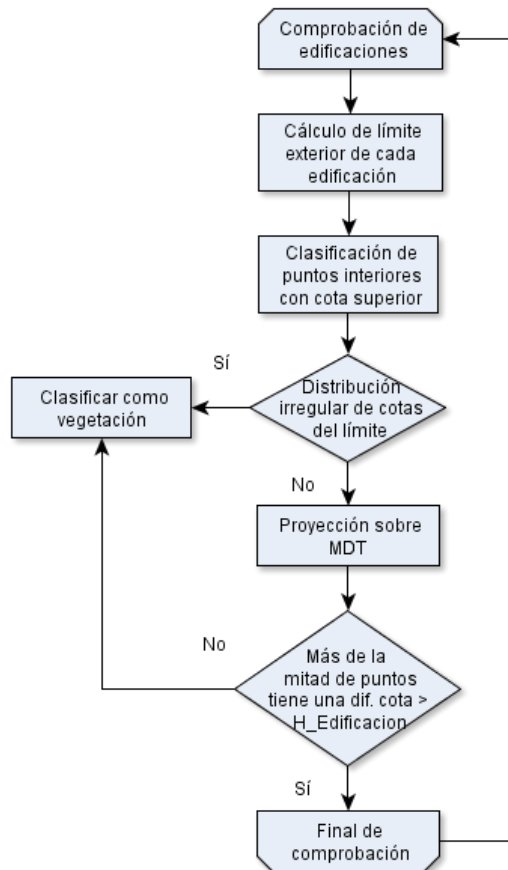


Figura 266: Diagrama de flujo para comprobar las edificaciones clasificadas.

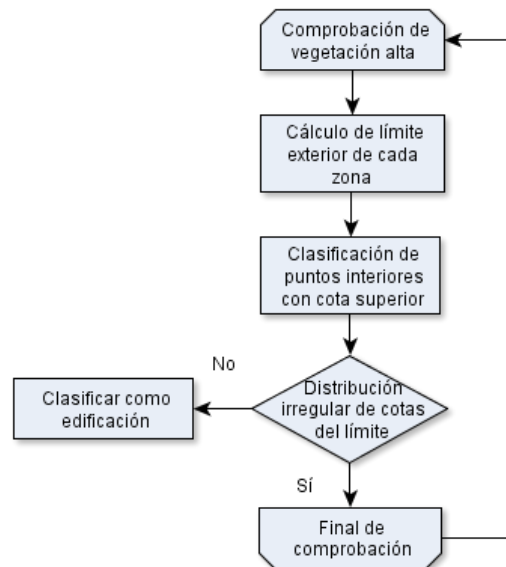


Figura 267: Diagrama de flujo para comprobar la vegetación alta clasificada.

## 6.1.5. Proceso completo

### 6.1.5.1. Supervisado

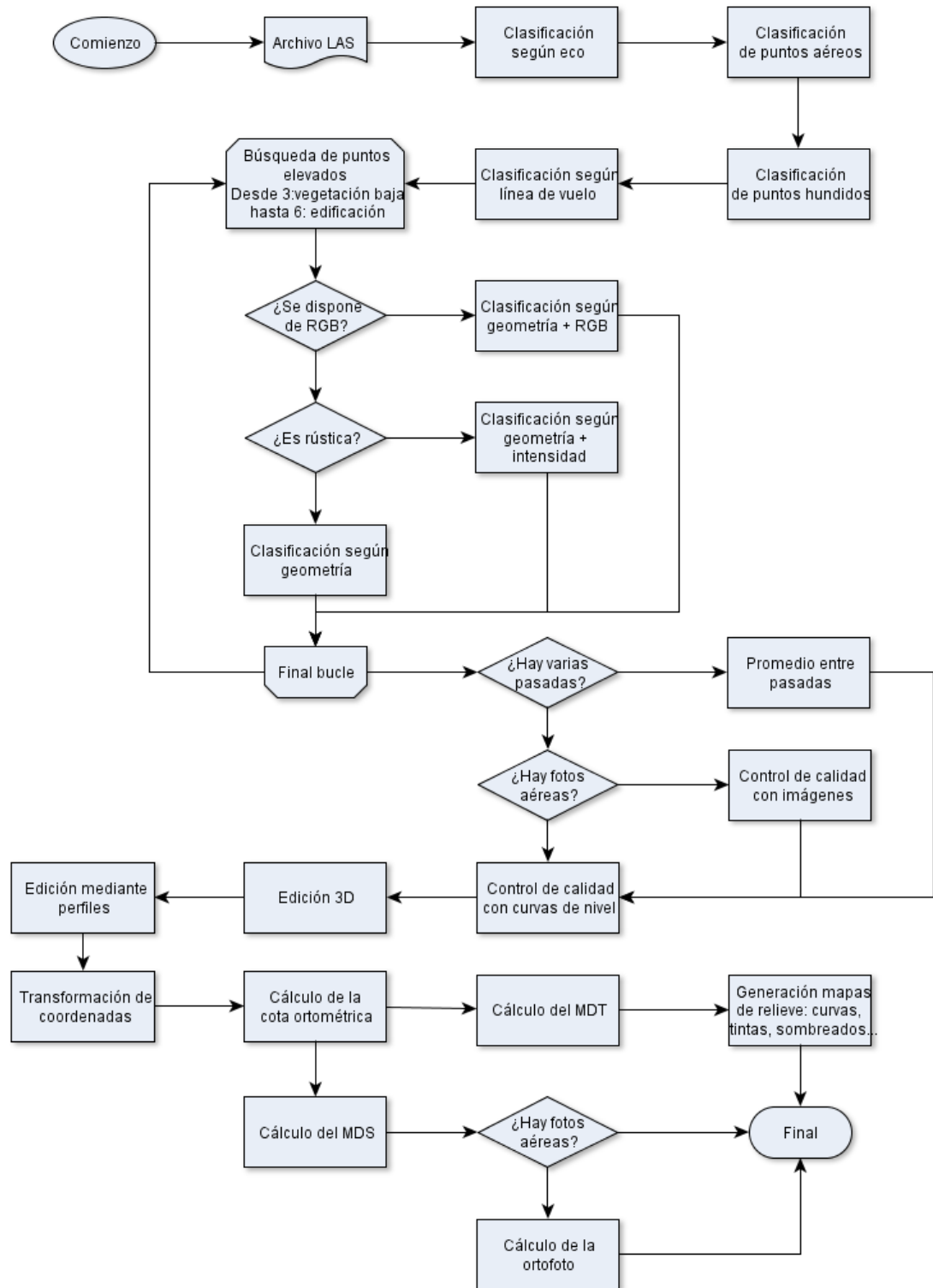


Figura 268: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos LiDAR de forma asistida.

### 6.1.5.2. No supervisado

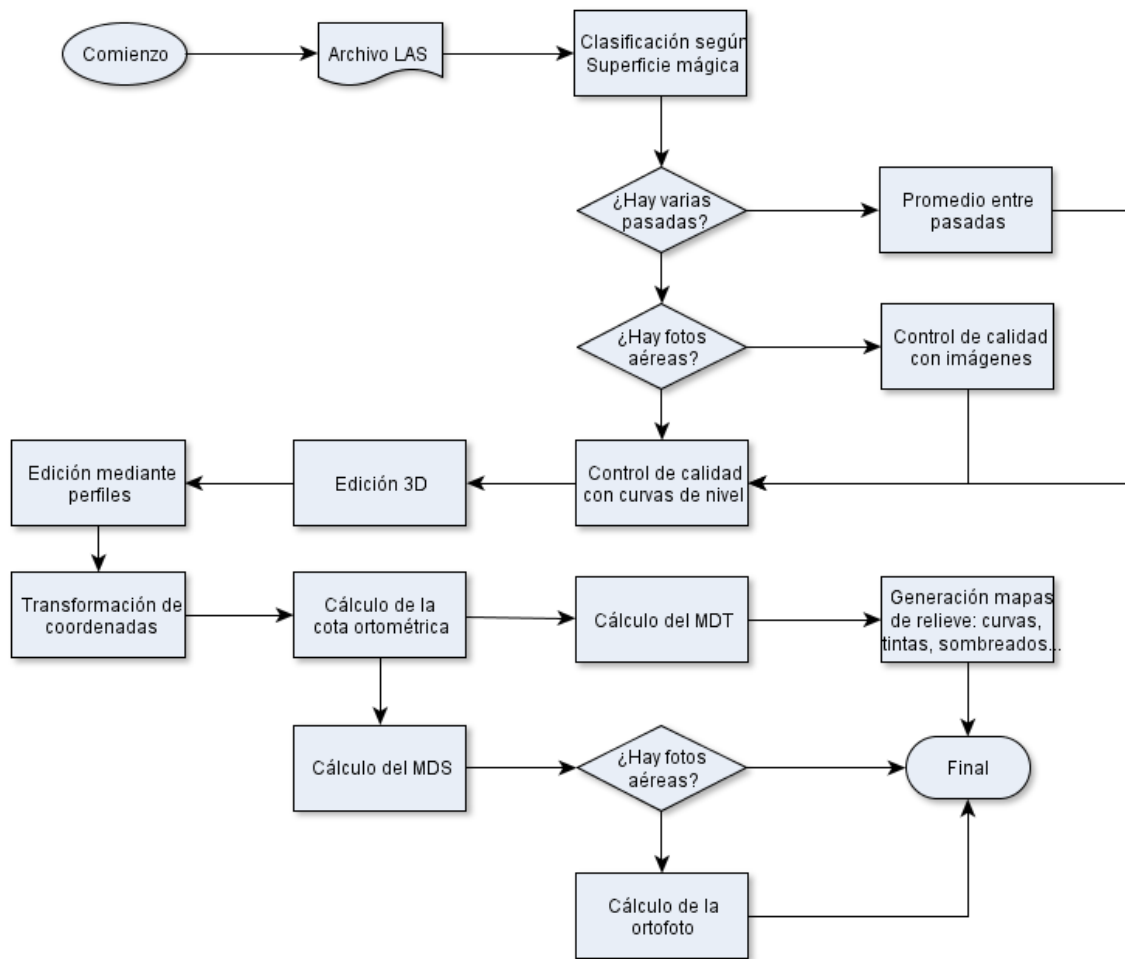


Figura 269: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos LiDAR de forma no asistida.

## 6.2. Manual de referencia

### 6.2.1. Introducción

A continuación, se detallarán las cabeceras de las funciones desarrolladas en C++ para probar el funcionamiento de los algoritmos explicados en el capítulo 5. La mayoría de estas funciones devuelve una variable de respuesta (ID de mensajes) con el correcto funcionamiento de la función o con el código de la incidencia.

### 6.2.2. Triangulación 2D

```
//=====
// Nombre ..... Run
// Parámetros ..... - Dibujo con puntos LiDAR
//                      - triangulación de salida
//                      - distancia máxima en metros
//                      - Archivos de referencia (opcional)
//                      - si se desea liberar memoria de los archivos después de
//                        cargarlos (opcional)
//                      - cadena donde se almacenara el nombre del archivo temporal
//                        con la triangulación (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Función para triangular un fichero de dibujo y sus posibles
//                      archivos de referencia
//=====
int Run (IN CDibujoDigi &dibujo, OUT CTriangulacion &mdt, double distanciaMax,
        vector <CDibujoDigi *> *dibujoRef/*=0*/, bool vaciarDibujo/*=false*/,
        CString *archivoTemporal/*=0/>)
```

### 6.2.3. Tetraedrización

```
//=====
// Nombre ..... Run
// Parámetros ..... - Dibujo con puntos LiDAR
//                      - triangulación de salida
//                      - distancia máxima en metros
//                      - si se desea liberar de memoria el archivo después
//                        de cargarlo (opcional)
//                      - cadena donde se almacenara el nombre del archivo
//                        temporal con la triangulación (opcional)
```

```
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Función para generar la tetraedrización de fichero de dibujo
//=====
int Run (IN CDibujoDigi &dibujo, OUT CTriangulacion &mdt, double distanciaMax,
        bool vaciarDibujo/*=false*/, CString *archivoTemporal/*=0*/)

```

## 6.2.4. Clasificación de puntos láser

### 6.2.4.1. En función de la geometría

```
//=====
// Nombre ..... RunPuntosAltos
// Parámetros ..... - Dibujo con puntos LiDAR
//                    - Distancia máxima entre los puntos en metros
//                    - Altura mínima para ser considerado punto alto
//                    - Tipo de los nuevos puntos
//                    - Si es vegetación baja
//                    - Cantidad de puntos clasificados
//                    - Archivos de referencia (opcional)
//                    - Selección de puntos (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Clasifica puntos LiDAR como tipoNuevo si cumple una alturaMin
//                    con respecto a su entorno. Si es vegetación baja no se
//                    generarán superficies. Si hay selección puede introducirse en
//                    la zona. En puntosClasificados se almacena la cantidad puntos
//                    clasificados
//=====
int RunPuntosAltos (CDibujoDigi &dibujo, vector <CDibujoDigi *> *dibujoRef,
        double distanciaMax, double alturaMin,
        const CInfoClasificacion &tipoNuevo, BOOL esVegetacionBaja,
        OUT UINT &puntosClasificados, vector <CDibujoDigi *> *dibujoRef/*=0*/,
        const vector<CPosicionEntidad> *zona/*=0*/)

```

### 6.2.4.2. En función del orden de registro

```
//=====
// Nombre ..... ClasificarSegunLineaVuelo
// Parámetros ..... - Distancia máxima entre los puntos en metros
//                    - Altura mínima para ser considerado vegetación baja
//                    - Altura mínima para ser considerado vegetación media
//                    - Altura mínima para ser considerado vegetación alta

```

```
//          - Altura mínima para ser considerado edificación
//          - Altura mínima para ser considerado aéreo
//          - Altura mínima para ser considerado hundido
//          - Distancia máxima del punto a la línea de registro
//          - Cantidad de puntos clasificados
//          - Desnivel medio calculado
//          - Distancia media calculada
//          - Selección de puntos (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Clasifica puntos LiDAR según su relación geométrica de los
//                  puntos registrados antes y después. Si hay selección puede
//                  introducirse en la zona. En puntosClasificados se almacena la
//                  cantidad puntos clasificados. Se calcula el desnivel y la
//                  distancia media entre puntos
//=====
int ClasificarSegunLineaVuelo (double distanciaMax, double alturaVegBaja,
    double alturaVegMedia, double alturaVegAlta, double alturaEdificio,
    double alturaAereos, double alturaHundidos, double tolAlineacion,
    OUT UINT &puntosClasificados, OUT double &desnivelMedio,
    OUT double &distanciaMedia, const vector<CPosicionEntidad> *zona/*=0*/)

```

### 6.2.4.3. En función de la radiometría

#### a) Información multiespectral

```
//=====
// Nombre ..... CambiarSegunColor
// Parámetros ..... - Lista con los colores para ser clasificados
//                  - Tipo de los nuevos puntos
//                  - Selección de puntos (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Clasifica puntos LiDAR como tipoNuevo si cumple un punto
//                  tiene como color almacenado alguno de la lista. Si hay
//                  selección puede introducirse en la zona
//=====
int CambiarSegunColor (const vector<CCondicionHRGB> &colores,
    const CInfoClasificacion &tipoNuevo,
    const vector<CPosicionEntidad> *zona/*=0*/)

```



## b) Información de intensidad

```
//=====
// Nombre ..... RunPuntosDifIntensidad
// Parámetros..... - Dibujo con puntos LiDAR
//                  - distancia máxima en metros
//                  - diferencia de intensidad entre puntos
//                  - tipo nuevo a clasificar los puntos
//                  - cantidad de puntos clasificados
//                  - Archivos de referencia (opcional)
//                  - Selección de puntos (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Clasifica puntos LiDAR como tipoNuevo si cumple una alturaMin
//                  con respecto a su entorno. Si hay selección puede
//                  introducirse en la zona. En puntosClasificados se almacena la
//                  cantidad puntos clasificados
//=====
int RunPuntosDifIntensidad (CDibujoDigi &dibujo, double distanciaMax,
    int difIntensidadMin, const CInfoClasificacion &tipoNuevo,
    UINT &puntosClasificados, vector <CDibujoDigi *> *dibujoRef/*=0*/,
    const vector<CPosicionEntidad> *zona/*=0*/)
```

## 6.2.4.4. En función de la geometría y radiometría

### a) Información multispectral

```
//=====
// Nombre ..... RunPuntosAltosRGB
// Parámetros ..... - Dibujo con puntos LiDAR
//                  - distancia máxima en metros
//                  - condiciones de altura mínima y color
//                  - cantidad de puntos clasificados
//                  - Archivos de referencia (opcional)
//                  - Selección de puntos (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Clasifica puntos LiDAR si cumple las condiciones de geometría
//                  con su entorno y color almacenado. Si hay selección puede
//                  introducirse en la zona. En puntosClasificados se almacena la
//                  cantidad puntos clasificados
//=====
int RunPuntosAltosRGB (CDibujoDigi &dibujo, double distanciaMax,
    const vector <CCondicionHRGB> &condiciones, OUT UINT &puntosClasificados,
```

```
vector <CDibujoDigi *> *dibujoRef/*=0*/,  
const vector<CPosicionEntidad> *zona/*=0*/)
```

#### b) Información de intensidad

```
//=====<=====
// Nombre ..... RunPuntosAltosIntensidad
// Parámetros ..... - Dibujo con puntos LiDAR
//                      - distancia máxima en metros
//                      - condiciones de altura mínima y color
//                      - cantidad de puntos clasificados
//                      - Archivos de referencia (opcional)
//                      - Selección de puntos (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Clasifica puntos LiDAR si cumple las condiciones de geometría
//                      con su entorno e intensidad almacenada. Si hay selección
//                      puede introducirse en la zona. En puntosClasificados se
//                      almacena la cantidad puntos clasificados
//=====
int RunPuntosAltosIntensidad (CDibujoDigi &dibujo, double distanciaMax,  
    const vector <CCondicionHIntensidad> &condiciones,  
    OUT UINT &puntosClasificados, vector <CDibujoDigi *> *dibujoRef/*=0*/,  
    const vector<CPosicionEntidad> *zona/*=0*/)
```

### 6.2.4.5. Detección de puntos erróneos

#### a) Elevados y hundidos

```
//=====
// Nombre ..... RunPuntosAereos
// Parámetros ..... - Dibujo con puntos LiDAR
//                      - distancia máxima en metros
//                      - diferencia en la desviación típica de la cota
//                      - tipo nuevo a clasificar los puntos
//                      - cantidad de puntos clasificados
//                      - posibles archivos de referencia (opcional)
//                      - Selección de puntos (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Clasifica puntos LiDAR como tipoNuevo si tienen una cota
```

```
//          superior o inferior a difCota veces la desviación típica de
//          la cota de los puntos de su entorno definido por la
//          distanciaMax. El signo de difCota marcará si se están
//          buscando puntos elevados o hundidos. Si hay selección puede
//          introducirse en la zona. En puntosClasificados se almacena la
//          cantidad puntos clasificados
//=====
int RunPuntosAereos (CDibujoDigi &dibujo, double distanciaMax, double difCota,
    const CInfoClasificacion &tipoNuevo, int &puntosClasificados,
    vector <CDibujoDigi *> *dibujoRef/*=0*/,
    const vector<CPosicionEntidad> *zona/*=0*/)
```

#### b) Aislados

```
//=====
// Nombre ..... RunPuntosAislados
// Parametros ..... - Dibujo con puntos LiDAR
//                   - distancia maxima en metros
//                   - número mínimo de vecinos
//                   - tipo nuevo a clasificar los puntos
//                   - cantidad de puntos clasificados
//                   - posibles archivos de referencia (opcional)
//                   - Selección de puntos (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripcion .... Clasifica puntos LiDAR como tipoNuevo si tienen menos
//                   vecinos que los indicados como parámetro. Si hay selección
//                   puede introducirse en la zona. En puntosClasificados
//                   se almacena la cantidad puntos clasificados
//=====
int RunPuntosAislados (CDibujoDigi &dibujo, double distanciaMax, UINT vecinos,
    const CInfoClasificacion &tipoNuevo, OUT UINT &puntosClasificados,
    vector <CDibujoDigi *> *dibujoRef/*=0*/,
    const vector<CPosicionEntidad> *zona/*=0*/)
```

### 6.2.4.6. Detección automática de puntos pertenecientes a edificaciones

#### a) Fachadas

```
//=====
// Nombre ..... BuscaParedesConPuntos
// Parámetros ..... - Número de puntos mínimo de la vertical
```

```
//          - Altura mínima para ser considerada fachada
//          - Diferencia XY máxima entre los puntos de la vertical
//          - Tipos de puntos a incluir
//          - Tipo nuevo de punto
//          - Cantidad de puntos clasificados
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Clasifica puntos LiDAR como tipoNuevo si forman parte de una
//                  línea vertical con alturaMin y que la formen al menos
//                  numPuntosMin. Los puntos no podrán diferenciarse en
//                  planimetría más de errorMax
//=====
int BuscaParedesConPuntos (UINT numPuntosMin, double alturaMin, double errorMax,
    const vector <CInfoClasificacion> &tiposIncluir,
    const CInfoClasificacion &tipoNuevo, OUT UINT &puntosClasificados)
```

#### b) Cubiertas

```
//=====
// Nombre ..... SuperficiesPlanas
// Parámetros ..... - Tipos de puntos a incluir
//                  - Información con las superficies
//                  - Cantidad de puntos clasificados
//                  - Selección de puntos (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Clasifica puntos LiDAR si forman parte de una superficie
//                  definida por su inclinación y área. En puntosClasificados se
//                  almacena la cantidad puntos clasificados
//=====
int SuperficiesPlanas (const vector<CInfoClasificacion> &indices,
    const CDataSuperficiesPlanas &data, OUT UINT &puntosClasificados,
    const vector<CPosicionEntidad> *zona/*=0*/)
```

#### 6.2.5. Extracción automática de líneas límite

```
//=====
// Nombre ..... LimiteDibujo
// Parámetros ..... - Dibujo de entrada
//                  - Dibujo de salida con los limites
//                  - distancia máxima entre puntos del límite (opcional)
//                  - desnivel máximo entre puntos del límite (opcional)
```

```
//          - si se desea liberar de memoria el archivo después de
//          cargarlo (opcional)
//          - si se desea utilizar un archivo temporal en disco para
//          ahorrar memoria (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Función para calcular los límites exteriores de un conjunto
//                  de entidades. Se puede establecer una distancia máxima entre
//                  los puntos del límite para extraer recovecos. También se
//                  puede establecer un desnivel máximo entre puntos del límite
//                  para no unir puntos de diferente cota, útil para extraer
//                  diferentes superficies en cotas diferentes, por ejemplo, de
//                  edificaciones
//=====
int LimiteDibujo (IN CDibujoDigi &dibujo, OUT CDibujoDigi &limiteDibujo,
    int distanciaMaxima/*=LONG_MAX*/, int desnivelMaximo/*=LONG_MAX*/,
    BOOL vaciarDibujo/*=FALSE*/, BOOL archivoTemp/*=FALSE/>)
```

## 6.2.6. Obtención de datos derivados

### 6.2.6.1. Mapas de curvas de nivel

```
//=====
// Nombre ..... CurvarNubePuntos
// Parámetros ..... - Información con las curvas de nivel
//                  - Cantidad de puntos clasificados
//                  - Selección de puntos (opcional)
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Curva una nube puntos LiDAR si según la información
//                  introducida en data. Opcionalmente, se pueden clasificar
//                  puntos en función de la morfología de las curvas de nivel. En
//                  puntosClasificados se almacena la cantidad puntos
//                  clasificados
//=====
int CurvarNubePuntos (const CDataCurvadoPuntos &data,
    OUT UINT &puntosClasificados, const vector<CPosicionEntidad> *zona/*=0*/)
```

### 6.2.6.2. Ortofotografía

```
//=====
// Nombre ..... CalculaOrto
// Parámetros ..... - objeto con la imagen de entrada
```

```
//          - datos de orientación de la imagen de entrada
//          - objeto con la imagen de salida
//          - tipo de interpolación:
//              . 0 : vecino más próximo
//              . 1 : interpolación bilineal
//              . 2 : interpolación cúbica
//          - si se desea calcular true orto
// Devuelve ..... ID de mensajes
// Descripción .... Función para calcular la ortorrectificación de una imagen.
//          La imagen tiene que tener los datos de orientación. Se puede
//          calcular true orto para lo cual se buscarán si existen zonas
//          de ocultaciones
//=====
int CDEM::CalculaOrto (IN IRaster *pRaster, const CDataImagen &dataImagen,
    OUT IRaster *pOrto, int interpolacion, BOOL trueOrto) const
```





# Validación del sistema

## 7.1. Ensayos realizados

### 7.1.1. Zona rústica

El primer estudio se ha realizado en una zona rústica, con presencia de árboles, cultivos y edificaciones aisladas. Permitirá conocer la precisión del registro LiDAR frente a otras técnicas de registro, así como el funcionamiento de algunos de algoritmos vistos para la detección de objetos (Arranz & Vigar, 2012). El proyecto consiste en un vuelo combinado, con cámara digital y LiDAR, cuya altura de vuelo fue de 1000 m, ocupando una extensión de 1454 Ha. La cámara utilizada es una Intergraph Z/I Imaging DMC con un GSD de 0.10 m y un sensor LiDAR Leica ALS60X. La precisión aproximada de los puntos obtenidos fue de 15 cm, encontrándose aproximadamente un punto por cada 1.25 m<sup>2</sup>. El avión realizó tres pasadas, creando así un solape entre ellas.



Figura 270: Esquema con las pasadas y los fotogramas realizados.

La zona era rústica, con terreno ondulado. Los objetos que se encontraron fueron pequeñas casas, líneas de alta tensión, caminos, carreteras y numerosas áreas de diferentes cultivos arbóreos. Entre estos cultivos se encontraron almendros, olivos y vides de distintos tamaños. Las pocas casas existentes no tienen más de dos plantas y sus tejados, mayoritariamente, son a dos aguas. Los caminos son de tierra definidos por pequeños montículos o surcos.

En el proceso de filtrado de puntos y en la generación de los modelos digitales, las coordenadas de los puntos no han sido modificadas. Son las mismas que cuando han sido tomadas, por lo tanto, la precisión se mantiene inalterada. Las precisiones a priori de los

puntos LiDAR de un vuelo para realizar cartografía a escala 1/1000 son de 10 cm en altimetría y de 15 cm en planimetría.

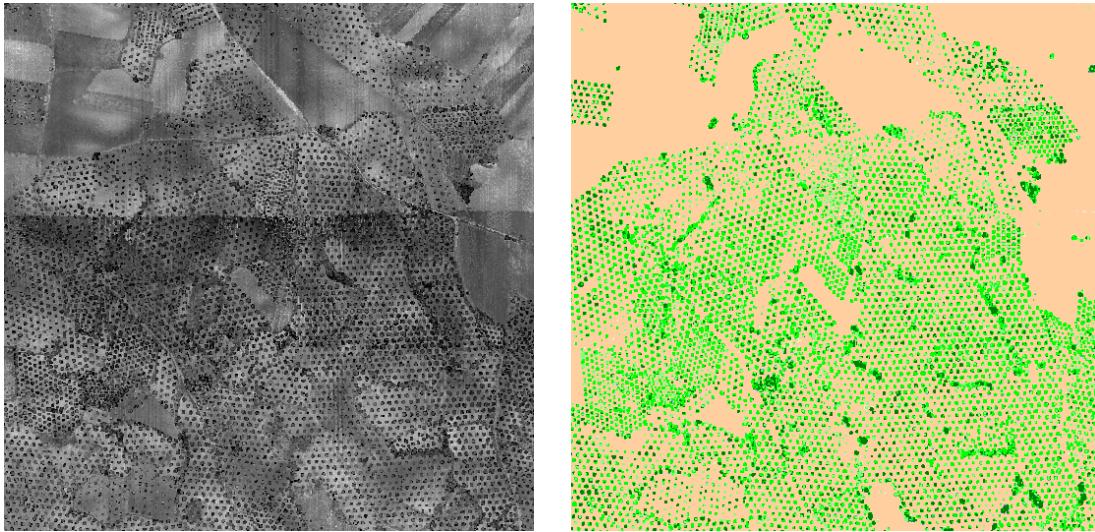


Figura 271: Ejemplos representativos de la zona. A la izquierda, visualizado utilizando la intensidad registrada por el sensor. A la derecha, visualizado utilizando la clasificación realizada. En la imagen izquierda, se puede apreciar la diferente densidad de puntos en la zona central, provocada por el solape de dos pasadas.

Para analizar la precisión real obtenida, se realizó un control de calidad en campo sobre los datos registrados. Para poder referenciar los datos obtenidos mediante fotogrametría clásica, LiDAR y GPS, se registraron los bordes de los caminos, ya que son identificables mediante todas estas técnicas. Se registraron casi ocho mil puntos GPS utilizando medición RTK, lo que garantizaría una precisión menor de 5 cm.



Figura 272: Distribución de los puntos medidos con GPS (color rojo) sobre las pasadas (color negro) y la ortofoto de la zona.

En altimetría, se proyectaron puntos obtenidos mediante GPS en RTK sobre un modelo digital obtenido a través de información LiDAR. El resultado fue una diferencia media de  $19 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ , un valor tolerable para cartografía a escala 1/1000, que requiere precisiones de 25 cm en la altimetría de los puntos. Los resultados pueden analizarse en la tabla 21.

Tabla 21: Comparaciones entre puntos GPS y LiDAR. Los valores están dados en metros.

Archivo	Media	Desviación típica	Valor máximo	Puntos comparados
LAS 3	0.16	0.04	0.25	475
LAS 4	0.14	0.04	0.28	307
LAS 5	0.16	0.05	0.38	581
LAS 10	0.22	0.06	0.39	270
LAS 11	0.19	0.06	0.41	1342
LAS 12	0.16	0.04	0.31	1460
LAS 13	0.27	0.08	0.49	374
LAS 14	0.18	0.04	0.31	189
LAS 19	0.20	0.04	0.38	525
LAS 20	0.24	0.05	0.45	707
LAS 21	0.23	0.05	0.42	585
LAS 22	0.24	0.06	0.41	383
LAS 27	0.14	0.05	0.35	98
LAS 28	0.13	0.05	0.33	455

Hay que precisar que los puntos LiDAR incluidos en el modelo digital para realizar el control de calidad son aquellos clasificados como suelo, por lo que si se incluye algún punto mal clasificado se detectaría con este control de calidad. Por ello, no solamente se está valorando la precisión de las mediciones si no, también, la clasificación realizada.

La existencia de solape entre pasadas LiDAR permite que se pueda obtener información acerca de la coherencia de los puntos medidos, analizando las diferencias que existen entre ellas. Se proyectaron puntos de una pasada sobre modelos digitales de terreno obtenidos con los puntos de otra pasada y se obtuvo una diferencia media de 10 cm, tolerable para cartografía a escala 1/1000.

También se proyectaron puntos obtenidos con fotogrametría clásica sobre modelos digitales de la misma zona obtenidos con información LiDAR, obteniendo una diferencia media de  $12 \text{ cm} \pm 22 \text{ cm}$ . Se observó que donde se producían más errores era en las líneas de ruptura. Esto es lógico, ya que la metodología LiDAR no define bien los bordes, debido a que la forma de recogida de datos no es de manera inteligente sino de manera regular no selectiva.

Tabla 22: Proyección de los puntos obtenidos por correlación sobre los MDT obtenidos por LiDAR.

Archivo	Media	Desviación típica	Valor máximo	Puntos comparados
LAS 2	0.05	0.19	5.09	10001
LAS 3	0.09	0.17	3.77	8026
LAS 10	0.10	0.24	3.15	33245
LAS 11	0.19	0.23	4.95	12608
LAS 18	0.19	0.31	6.06	27342
LAS 19	0.14	0.29	5.80	15315
LAS 26	0.01	0.15	2.63	7864
LAS 27	0.19	0.17	2.07	6081

Por otro lado, al proyectar los puntos obtenidos con LiDAR sobre modelos digitales del terreno obtenidos a partir de fotogrametría clásica, es decir, a la inversa que anteriormente, se obtuvo una diferencia media de  $14 \text{ cm} \pm 21 \text{ cm}$  pero, en este caso, los puntos donde los errores eran mayores estaban en los pequeños cambios de pendiente. Esto puede ser debido a que el LiDAR genera unos modelos digitales más completos que la fotogrametría clásica, ya que cualquier pequeño cambio en el terreno lo tiene en cuenta, mientras que la restitución fotogramétrica no. Si se quisiera tener un modelo digital con fotogrametría clásica tan completo como con LiDAR, el tiempo que se tardaría sería tremendamente alto y, en consecuencia, excesivamente caro.

Tabla 23: Proyección de los puntos obtenidos por LiDAR sobre los MDT obtenidos por correlación.

Archivo	Media	Desviación típica	Valor máximo	Puntos comparados
LAS 2	-0.07	0.15	2.43	668868
LAS 3	-0.10	0.15	2.04	453825
LAS 10	-0.14	0.20	4.06	1168390
LAS 11	-0.20	0.22	3.35	667242
LAS 18	-0.23	0.30	3.43	1112298
LAS 19	-0.17	0.26	3.58	665857
LAS 26	-0.01	0.17	1.80	511833
LAS 27	-0.23	0.21	9.13	382359

Además de la comprobación de la eficacia de la metodología propuesta, se procedió a comparar el tiempo empleado con otras técnicas. Para ello, se obtuvieron modelos digitales del terreno con ambas técnicas y se midió el tiempo que se tardó con cada una de ellas. En el caso de la fotogrametría clásica, el tiempo que se tardó en orientar el par, restituir las líneas de ruptura, realizar la correlación automática y generar un modelo digital del terreno fue de 3 horas, frente a 1 hora y media que se tardó en filtrar los puntos LiDAR y generar un modelo digital del terreno.

Pero, además, el modelo digital obtenido por LiDAR cubría más extensión que el obtenido con fotogrametría. Para cubrir aproximadamente 1500 Ha de una zona rústica a escala 1/1000 son necesarios 63 modelos estereoscópicos. En cambio, en LiDAR para cubrir lo mismo son necesarios 32 ficheros. Por lo tanto, para cubrir 1500 Ha se tarda alrededor de 189 horas con fotogrametría y 48 horas con LiDAR, casi un 75% menos. En fotogrametría, que un operador sea experto marca una diferencia tanto en el tiempo que se tarda en obtener cartografía como en la calidad de la misma. Sin embargo, con la tecnología LiDAR no existe esa gran diferencia entre operadores, la calidad y el tiempo empleado serán aproximadamente los mismos.

Un tercer parámetro evaluado fue el coste económico necesario para la obtención de los datos. Un vuelo LiDAR es más caro que un vuelo fotogramétrico; además, normalmente en los vuelos LiDAR, también se toman las fotografías aéreas, por lo tanto, resulta aún más caro. Pero como el tiempo de edición es mucho menor con LiDAR, se consigue compensar los costes, por lo que no se podrá elegir entre una u otra técnica en función del coste final. Cuando se trabaja con LiDAR es de gran ayuda contar con las fotografías aéreas de la zona a la hora de la clasificación de puntos y, en el caso de que posteriormente se quieran obtener ortoimágenes, son indispensables.

Las ortoimágenes se han venido haciendo con los modelos digitales obtenidos con la misma restitución de las fotografías pero ahora también se pueden obtener con modelos calculados a partir de información LiDAR. Las ortoimágenes logradas serán muy completas, gracias a que los modelos tienen más información. Además, se podrá realizar *true-orto* utilizando el MDS generado. Sin embargo, se debe asegurar que no exista ningún desplazamiento entre las imágenes y la información LiDAR resultado de algún error de calibración o sistematismo.

### 7.1.2. Zona urbana

Otro de los ensayos realizados, ha tenido como objeto comprobar la bondad de los algoritmos en una zona urbana con presencia de edificaciones, vegetación, automóviles y mobiliario urbano. Para ello, se utilizó un vuelo realizado a una altura de 700 m con una densidad de puntos de 1.29 puntos/m<sup>2</sup>, lo que significa que se tienen puntos cada 90 cm aproximadamente, que permitirían realizar una cartografía 1/500 de la zona. La precisión aproximada de los puntos en coordenadas terreno es superior a 10 cm. La superficie total es de 190 Ha incluyendo más de tres millones de puntos.

La zona incluye edificaciones de diversas alturas, desde dos plantas hasta diez plantas en viviendas. Asimismo, incluye bastante arbolado entre las edificaciones que podría perturbar el funcionamiento del algoritmo.

La figura 273 muestra parte de la zona registrada utilizando una escala de grises en función de la intensidad registrada por el sensor. La parte izquierda de la imagen está poblada de edificios de viviendas de gran altura. Existe una autopista en la parte central y en



la parte derecha se encuentran edificios de baja altura rodeados de numerosos árboles de mayor altura que los propios edificios.

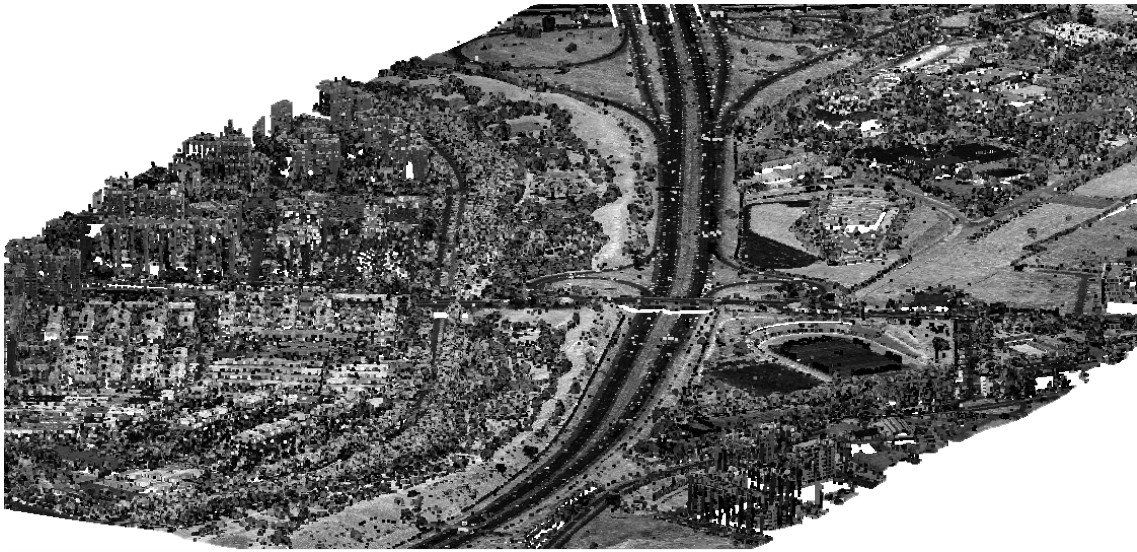


Figura 273: Nube de puntos LiDAR representada según la intensidad registrada por el sensor.

La figura 274 muestra la misma zona utilizando una gama de tintas hipsométricas, dando color en función de la altura de los puntos. Según estos colores, se puede apreciar la altura de cada zona.

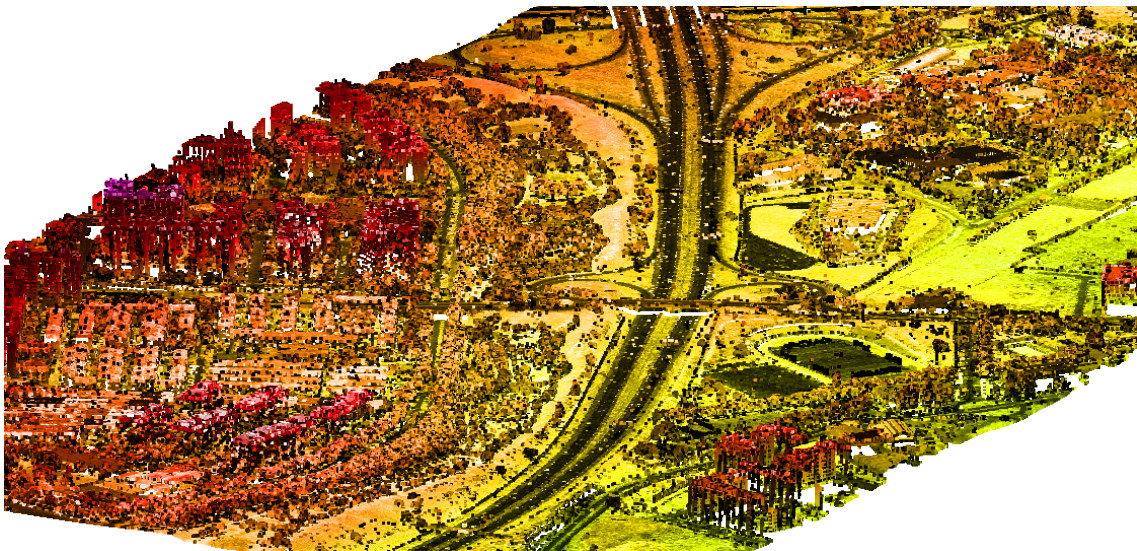


Figura 274: Nube de puntos LiDAR representada utilizando una gama de tintas hipsométricas.

A partir de estos datos, se han probado algunos de los algoritmos propuestos. El primer paso es la detección de los puntos elevados, es decir, aquellos que superen un umbral mínimo de altura con respecto a su entorno más inmediato y que, para este ejemplo, se ha establecido en 3 m. Asimismo, el algoritmo precisa que se le indique un valor de proximidad entre puntos para no realizar consideraciones entre puntos alejados en el espacio. Sabiendo que el sensor ha registrado puntos a una distancia inferior al metro, este

valor también ha sido de 3 m. Después de varias iteraciones para localizar todos los puntos elevados, se han clasificado 843810 puntos lo que representa un 27% de puntos del fichero.

El segundo paso es la detección de los puntos pertenecientes a fachadas de edificaciones y que no serán útiles para ningún proceso posterior por lo que incluso se podrían eliminar. El algoritmo clasifica 81897 puntos.

El último paso en el proceso de clasificación sería la detección de los puntos pertenecientes a las azoteas de los edificios. El programa precisa de dos parámetros adicionales que caracterizarían las construcciones de la zona y son la pendiente máxima que puede alcanzar un plano que defina una edificación y el tamaño mínimo que debe alcanzar la superficie del plano. Estos valores se han fijado en 30°, sabiendo que la mayoría de las edificaciones poseen cubiertas horizontales, y 30 m<sup>2</sup>, respectivamente. Según esto, el algoritmo clasifica 300245 puntos.

Después de aplicar la herramienta sobre el archivo, se obtiene una clasificación como la mostrada por la figura 275, donde se muestra los datos en planta.



Figura 275: Datos LiDAR clasificados. De color marrón claro los puntos clasificados como suelo, de color verde la vegetación y de color magenta las edificaciones.

La figura 276 muestra el archivo desde una determinada perspectiva inclinada para percibir los puntos clasificados como fachadas.





Figura 276: Puntos LiDAR clasificados. De color azul, los puntos sobre fachadas.

Con los puntos sobre las edificaciones clasificados, se puede ejecutar el algoritmo de cálculo de los límites de edificación. El resultado de este proceso será un archivo vectorial con los límites que definen a los edificios de la zona. Se generan un total de 325 superficies. La bondad de su cálculo se puede probar mediante las fotografías aéreas de la zona. En la figura 277 se muestra parte del archivo donde se encuentran bloques de viviendas.

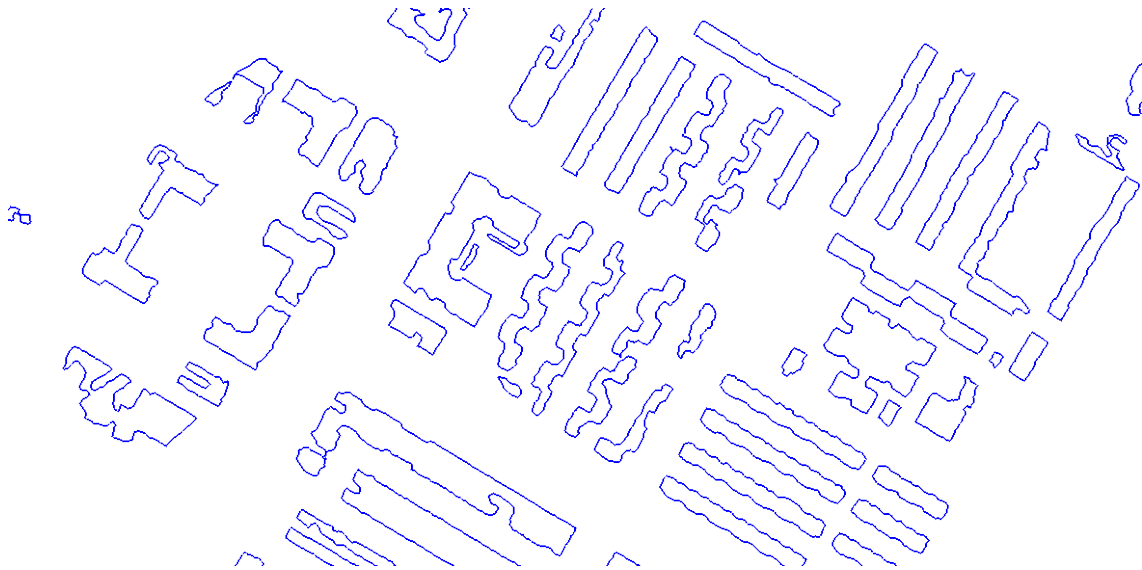


Figura 277: Límites generados a partir de los datos LiDAR clasificados como edificación.

La figura 278 muestra los límites generados con la fotografía aérea de fondo para comprobar la bondad de los resultados. La zona representada tiene edificios de poca altura y árboles entre los edificios que dificultan el cálculo. Aun así, se detectan los límites de las edificaciones con pequeños errores puntuales, pero salvando los árboles circundantes.



Figura 278: Límites de edificaciones generados con la imagen aérea de fondo.

Estos límites podrán servir para realizar un modelo tridimensional de la zona, representando las edificaciones como objetos con volumen, como muestra la figura 279.

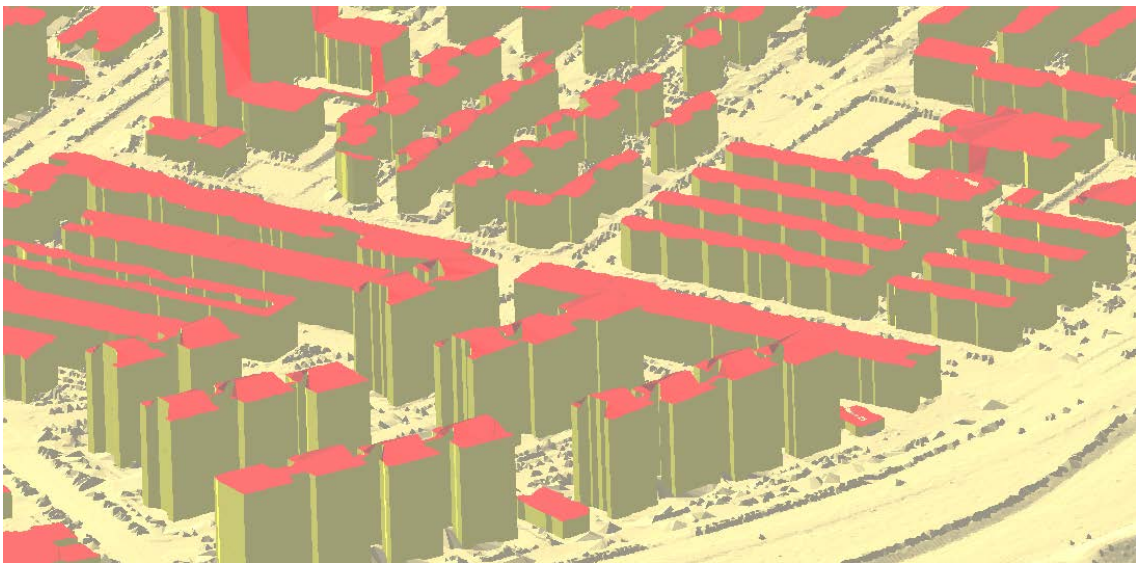


Figura 279: Modelo digital con edificaciones proyectadas.

Además, se podría mejorar este modelo utilizando como tapiz la propia imagen aérea, como muestra la figura 280.





Figura 280: Modelo digital con edificaciones proyectadas y ortofotografía.

A la vista de los resultados, se podría afirmar que el algoritmo permite encontrar un alto porcentaje de puntos pertenecientes a edificaciones, discriminando otros objetos con altura similar a este tipo de objetos. Además, a partir de estos puntos, es posible calcular los límites de las edificaciones, pudiendo ser utilizados para cartografía general o para recreaciones virtuales.

### 7.1.3. Zona de gran densidad de vegetación

Para comprobar la utilidad del registro mediante LiDAR en zonas donde la Fotogrametría tiene dificultades, se realizó un ensayo en una zona con gran densidad de vegetación. Se trata de un proyecto realizado por la empresa EDEF para la ingeniería TYPESA con el objeto de realizar cartografía de zonas de regadío en el norte de Kenia. Este proyecto utiliza un vuelo fotogramétrico con un GSD de 11 cm para realizar cartografía a escala 1/1000. Además, se realizó registro mediante un sensor LiDAR con una densidad media de 1.5 puntos por  $m^2$ .

La zona registrada comprende los alrededores de un río con laderas de fuerte pendiente pobladas de numerosos árboles que impidieron el registro de la altimetría por medio de curvas de nivel restituídas. Las curvas de nivel procedentes de restitución fotogramétrica se obtuvieron por medio de procesos de interpolación. Por tanto, las curvas de nivel generadas no contemplaban detalles de micro-relieve o pequeñas líneas estructurales, ya que no se disponía de la imagen estereoscópica.

Sin embargo, a partir de los datos LiDAR, se ha realizado una clasificación de los datos, que permitió separar la información procedente del suelo desnudo de la procedente de la vegetación. A partir de los puntos pertenecientes al suelo desnudo, ha sido posible generar un curvado apreciándose los detalles del relieve incluso en zonas de gran densidad arbórea.



La siguiente figura muestra la imagen del satélite GeoEye de una de las zonas cartografiadas. Como se puede observar, aparece un río en la parte central. La zona norte está poblada de numerosos árboles que impiden ver el suelo mediante estereoscopía. La zona sur son campos de cultivo sin vegetación arbórea.



Figura 281: Imagen de satélite del proyecto de regadío en Kenia.

La siguiente figura muestra una vista en perspectiva del río utilizando la nube de puntos LiDAR ya clasificada. Se puede observar la vegetación clasificada en la parte izquierda correspondiente a la zona norte del río.

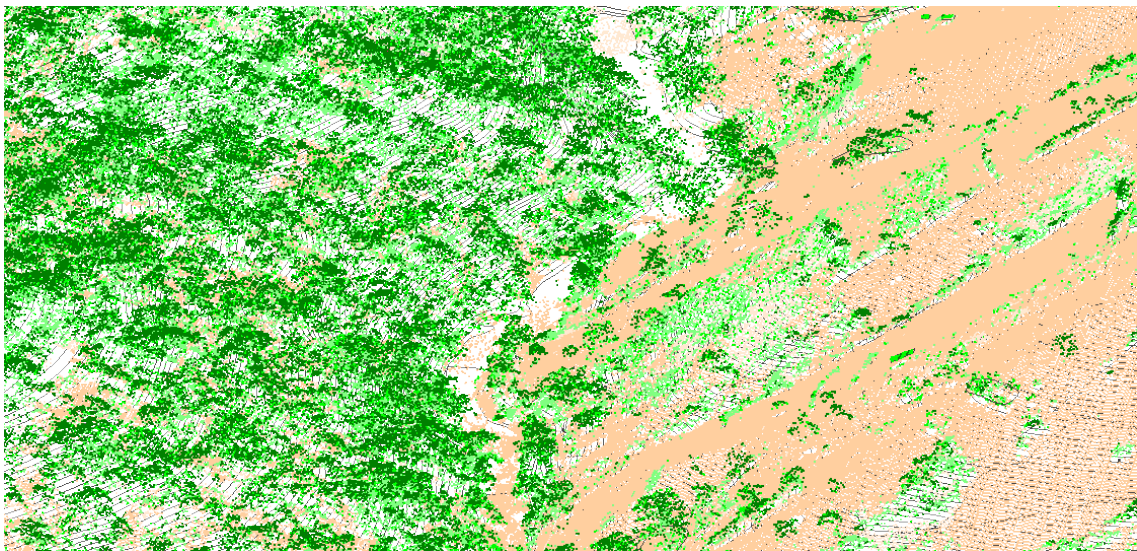


Figura 282: Nube de puntos LiDAR clasificada del proyecto de regadío en Kenia.

La siguiente figura muestra las curvas de nivel obtenidas mediante procesos fotogramétricos. En la zona izquierda, poblada de árboles, se tuvieron que obtener mediante



interpolación utilizando como información de base aquellas zonas donde se pudo restituir estereoscópicamente.

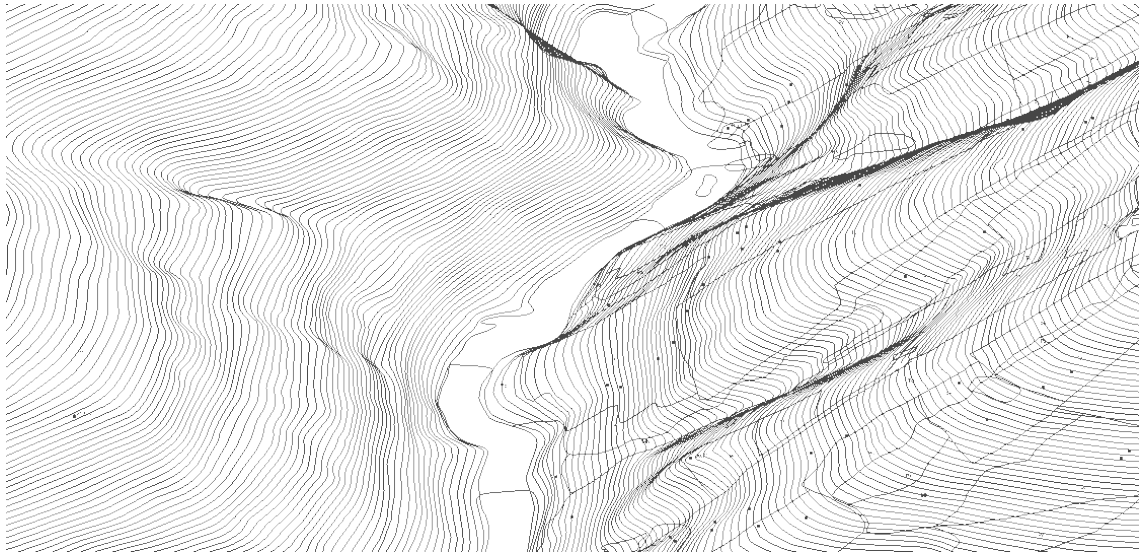


Figura 283: Curvas de nivel obtenidas mediante restitución fotogramétrica del proyecto de regadío en Kenia.

Por último, la siguiente figura muestra las curvas de nivel obtenidas a partir de los datos LiDAR clasificados como suelo. Se puede observar la diferencia de detalle respecto a la figura anterior. En la parte de la derecha, donde no existe vegetación arbórea, prácticamente no hay diferencia. Pero en la parte izquierda, el nivel de detalle de la información LiDAR es mucho mayor, siendo más veraz ya que utiliza mayor cantidad de puntos. Para la obtención de este curvado se ha utilizado el algoritmo expuesto en el apartado 5.7.2, que no precisa el cálculo de un modelo digital.

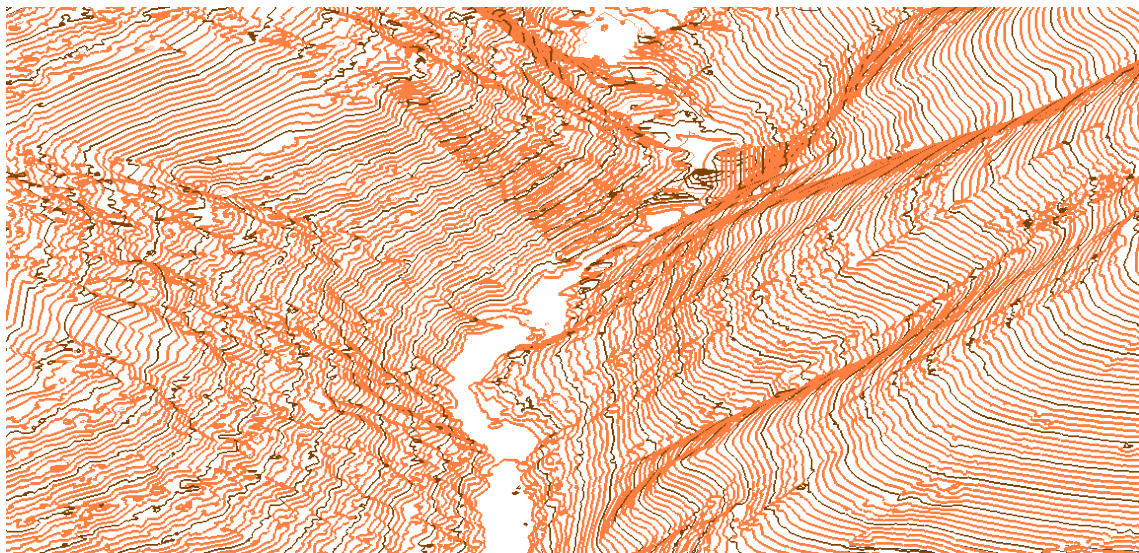


Figura 284: Curvas de nivel obtenidas a partir de los datos LiDAR del proyecto de regadío en Kenia.

Con este ensayo, se ha puesto de relieve la utilidad de los sensores LiDAR por la posibilidad de medir puntos en el suelo. Esto es gracias al registro de múltiples ecos del rayo en su trayectoria, devolviendo puntos medidos en las copas de los árboles, en las ramas

intermedias y, en muchos casos, en el suelo. Además, ha permitido comprobar la herramienta de clasificación en un entorno con alta densidad de vegetación y pocos puntos sobre el terreno desnudo. Sus resultados han sido óptimos, mejorando los obtenidos por medio de procesos fotogramétricos.

#### 7.1.4. Fachada arquitectónica

Para comprobar la funcionalidad del láser escáner terrestre y comprobar los algoritmos desarrollados con los datos recogidos, se eligió un edificio emblemático de la ciudad de Madrid como es la Casa de la Villa. Este edificio del siglo XVII y de estilo barroco está situado en la Plaza de la Villa, en el centro de Madrid. Hasta hace poco, fue sede del Ayuntamiento de Madrid. Su diseño se debe al arquitecto Juan Gómez de Mora y está declarado edificio de valor histórico-artístico.

Para su registro se utilizó un láser escáner basado en pulso, modelo Leica C10. Para la unión de las nubes de puntos registradas se utilizaron placas de puntería y las estaciones fueron dotadas de coordenadas utilizando receptores GNSS. Además de la información radiométrica recogida por el sensor láser, se tomaron fotografías con cámaras no métricas.



Figura 285: Imágenes de la toma de datos en campo.

Una vez se obtuvo toda la nube de puntos georreferenciada en un único sistema de referencia, se procedió a calcular la georreferenciación de las imágenes. Para ello, se utilizó el algoritmo presentado en el apartado 5.6.2, basado en la DLT. Se eligieron puntos de control distribuidos por toda la imagen y que se encontraran en diferentes planos en la nube de puntos.

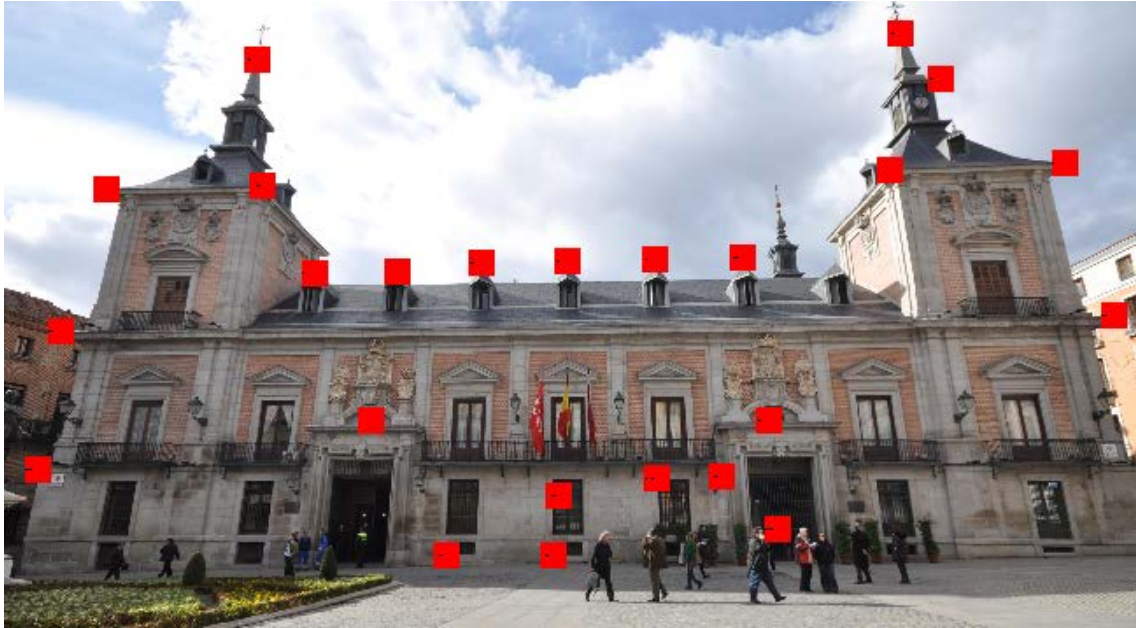


Figura 286: Imagen tomada con cámara réflex no métrica más los puntos de control medidos para el cálculo de la orientación de la imagen.

Las coordenadas de estos puntos se obtuvieron identificando detalles sobre los datos LiDAR, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 287: Nube de puntos LiDAR con la posición de los puntos de control.

Los valores obtenidos en la georreferenciación de la imagen que incluía toda la fachada, calculados con el algoritmo anteriormente mencionado, fueron los siguientes:

Cálculo de los parámetros de orientación mediante DLT (Direct Linear Transformation)

Coordenadas de los puntos dato					
Punto	X_imagen	Y_imagen	X_terreno	Y_terreno	Z_terreno
1	306.256	1529.551	9.810	44.660	17.170
2	748.040	1536.861	11.620	36.040	17.210
3	3001.477	1603.598	20.220	-5.590	17.280
4	2510.664	1582.661	18.400	2.870	17.220
5	3138.848	1172.521	20.060	-5.880	8.870
6	177.731	1130.747	9.320	44.800	8.780
7	732.447	1894.859	14.900	41.250	29.620
8	2538.045	1964.759	23.400	-0.340	29.620
9	2653.831	1839.168	22.490	-1.820	25.140
10	115.394	742.921	9.620	44.600	1.880
11	1049.753	879.577	13.760	29.420	4.280
12	1580.324	666.026	15.150	19.800	0.560
13	893.295	1294.264	14.750	34.620	13.340
14	1124.515	1298.074	15.750	29.880	13.280
15	1363.164	1323.577	16.810	25.050	13.710
16	1604.412	1328.339	17.760	20.210	13.670
17	1848.081	1333.185	18.760	15.390	13.700
18	2097.561	1336.304	19.790	10.530	13.660
19	2171.717	879.786	17.480	10.130	4.130
20	2192.681	573.863	17.470	10.170	-0.870
21	1262.424	499.609	13.970	25.000	-2.070
22	1561.942	497.541	14.970	20.220	-2.070
23	1856.579	715.639	15.970	15.400	1.330
24	2035.787	719.628	15.730	12.520	1.340

Resultados obtenidos mediante DLT

Coordenada X punto principal	:	1620.811 píxeles
Coordenada Y punto principal	:	1057.773 píxeles
Focal X	:	1705.209 píxeles
Focal Y	:	1714.148 píxeles
Coordenada X centro proyección	:	-12.897 m
Coordenada Y centro proyección	:	11.868 m
Coordenada Z centro proyección	:	-0.935 m
Omega (ángulo eje X)	:	138.175 deg
Phi (ángulo eje Y)	:	291.433 deg
Kappa (ángulo eje Z)	:	45.912 deg
Distorsión de las lentes	:	7.381e-015

Cálculo de los parámetros de orientación mediante las ecuaciones de colinealidad

Residuos de los puntos dato

Punto	rX	rY
1	1.078	-3.165
2	-6.027	2.033
3	-1.168	-1.360
4	8.208	6.065
5	-5.872	-0.645
6	2.440	-2.107
7	2.225	-1.865
8	-1.838	-1.895
9	1.017	-1.131
10	3.139	0.621
11	-3.851	-0.820
12	6.617	-0.515
13	-3.423	4.884
14	-2.639	2.430
15	0.099	-0.153
16	0.220	-0.930
17	1.361	0.354
18	2.303	-0.202
19	-0.545	0.407
20	2.403	1.359
21	-3.792	-0.004
22	-3.844	0.859
23	0.588	-2.014
24	1.299	-2.205

Desviación típica : 3.192 píxeles

Resultados finales

Coordenada X punto principal	:	1613.973 ±	9.867 píxeles
Coordenada Y punto principal	:	1033.498 ±	7.992 píxeles
Focal	:	1598.664 ±	31.236 píxeles
Coordenada X centro proyección	:	-11.081 ±	0.498 m
Coordenada Y centro proyección	:	12.604 ±	0.171 m
Coordenada Z centro proyección	:	-0.121 ±	0.222 m
Omega (ángulo eje X)	:	135.8988 ±	0.8199 deg
Phi (ángulo eje Y)	:	290.2576 ±	0.3585 deg
Kappa (ángulo eje Z)	:	44.1044 ±	0.0470 deg



Con la georreferenciación de la imagen, se pudieron fusionar ambos tipos de datos. La primera utilidad podría ser la restitución en monoscópico pero tridimensional de líneas definitorias de la fachada.



Figura 288: Imagen orientada más los puntos LiDAR.

La segunda utilidad de esta fusión, sería la adición del valor del píxel de la imagen sobre los puntos LiDAR, dando mayores posibilidades de visualización e, incluso, de clasificación de puntos.



Figura 289: Nube de puntos LiDAR representada utilizando el valor de RGB añadido de la fotografía.

Con esta nueva información se podrían clasificar los puntos en función del material que los reflejó. Sin embargo, la cámara utilizada para tal efecto no tenía el suficiente poder radiométrico por lo que los resultados no fueron óptimos.

No obstante, se pudo calcular el modelo 3D utilizando el algoritmo presentado en el apartado 5.3, basado en la tetraedrización de Delaunay. A partir de ésta, se puede calcular el modelo 2.5D con los triángulos exteriores, como se explicó en el apartado 5.3.3, para poder calcular la ortofoto.



Figura 290: Ortofotografía de la Casa de la Villa.

### 7.1.5. Grabados rupestres

Los grabados rupestres o petroglifos son representaciones gráficas grabadas en rocas o piedras realizados por nuestros antepasados prehistóricos, sobre todo a partir del Neolítico. Son el más cercano antecedente de los símbolos previos a la escritura y su uso en la comunicación data del 10000 a.C. y llega a los tiempos modernos, dependiendo de la cultura y el lugar. La palabra proviene de los términos griegos *petros* (piedra) y *glyphein* (tallar) y fue en su origen acuñada en francés como *pétroglyphe*.

Este término no debe confundirse con pictografía, que es una imagen dibujada o pintada en la roca, aunque ambos pertenecen a la categoría general y más amplia del arte rupestre. Las petroformas o modelos y figuras hechas en grandes rocas en el suelo, tampoco son muy parecidas.

Se realizó una experiencia en el parque arqueológico de Campo Lameiro (Pontevedra), donde se encuentra una de las zonas más importantes de Europa en cuanto a arte rupestre prehistórico se refiere, declarado Monumento Histórico Artístico. El parque se



sitúa en el valle del río Lézor y comprende una gran cantidad de grabados rupestres de gran calidad sobre roca granítica al aire libre. Los grabados fueron realizados mediante percusión creando formas geométricas (círculos, espirales o laberintos), figuras de animales (ciervos, caballos), utensilios y formas antropomórficas (Rey, et al., 2004).

El ensayo se centró en uno de los petroglifos, denominado “Laxe da Forneiriña”. En esta piedra (laxe) están representados varios animales y círculos concéntricos, destacando un gran animal grabado, aunque difícilmente distinguible a qué especie pertenece. La roca se encuentra semi-enterrada mostrando una cara completa y dos laterales.

El registro se realizó con un escáner láser basado en pulso, modelo Leica HDS 3000. Se realizaron varios estacionamientos para cubrir toda la superficie de la roca. Para la unión de las nubes de puntos registradas se utilizaron placas de puntería, las cuales fueron medidas con una estación total Leica SmartStation con antena GNSS incorporada. Las coordenadas de los estacionamientos fueron calculadas a partir de estas. Esta operativa es habitual para el registro de este tipo de objetos, buscando el registro de precisión de los grabados que en ellos se encuentran (Cabrejas, et al., 2009).





Figura 291: Diversas imágenes donde se puede apreciar el petroglifo desde diversos puntos de vista y el estacionamiento realizado con el escáner láser y la estación topográfica para dar coordenadas a las dianas.

Una vez se unieron todas las nubes de puntos en un solo archivo georreferenciado, se procedió a calcular el modelo utilizando la tetraedrización 3D. Con este modelo se pudieron realizar animaciones y presentaciones tridimensionales del estado del petroglifo, por ejemplo, utilizando el parámetro intensidad como en la siguiente figura.

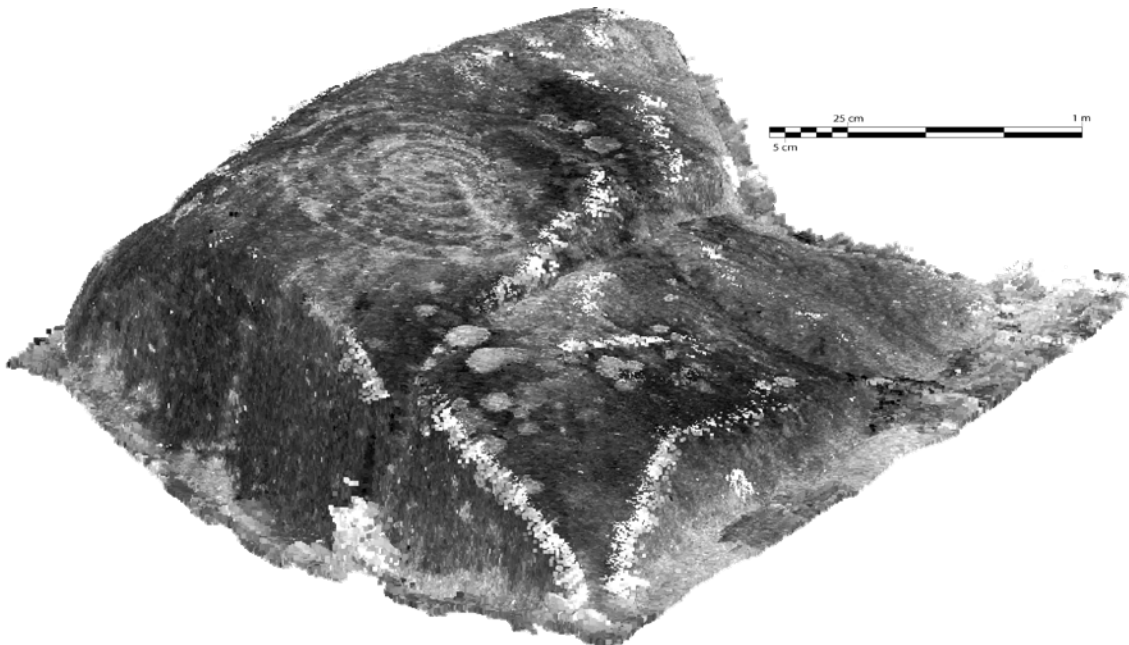


Figura 292: Imagen correspondiente al registro LiDAR visualizando la nube de puntos utilizando la intensidad reflejada por el petroglifo.



La siguiente figura muestra el modelo digital debidamente iluminado resaltando los grabados y las fisuras del petroglifo.

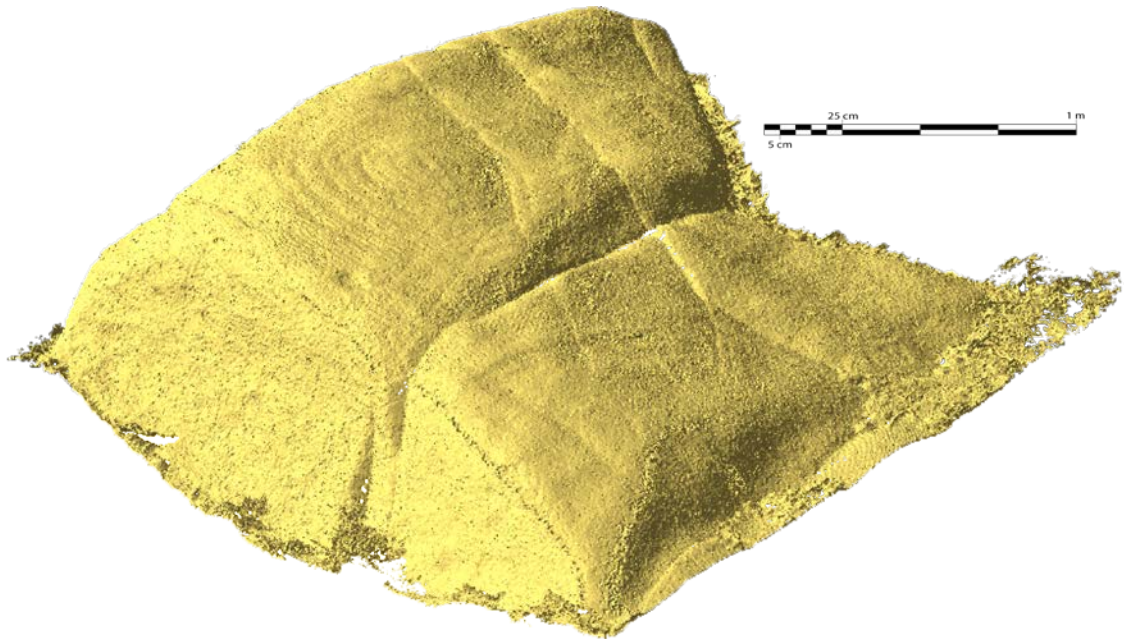


Figura 293: Modelo digital generado con la nube de puntos.

La primera impresión es la posibilidad de extraer de forma automática las líneas que definen los grabados y las principales líneas estructurales de la roca. Sin embargo, un análisis detallado del registro pone de relieve el ruido que contiene la nube de puntos lo que dificulta la identificación de la posición de dichas líneas. Si este ruido es eliminado en un proceso de suavizado del modelo, se pierden igualmente los grabados los cuales son inferiores a 2 mm.

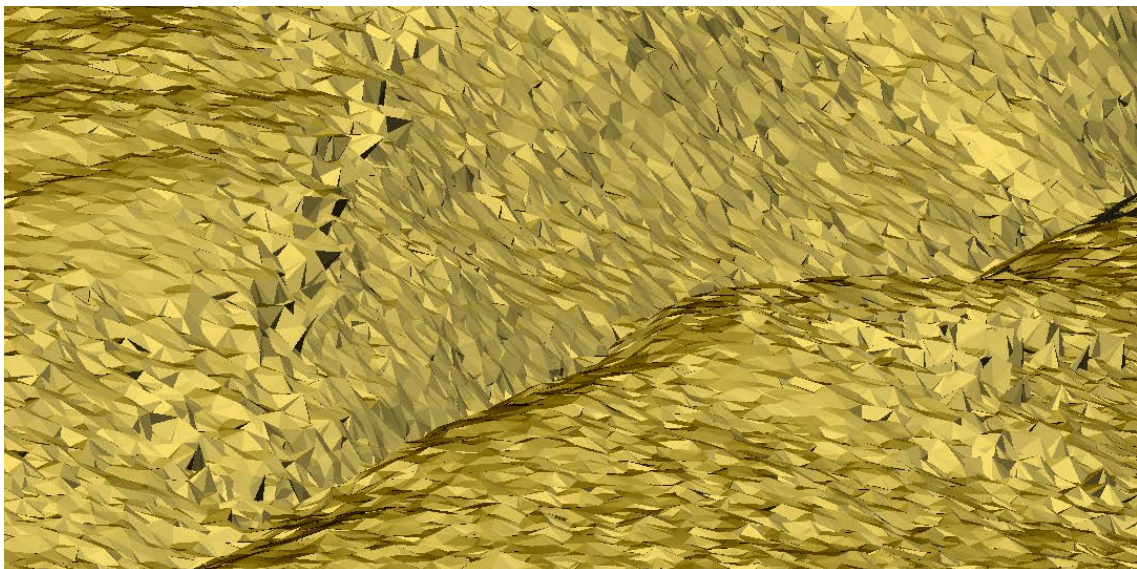


Figura 294: Imagen de detalle del modelo digital.

Se concluye que el sensor utilizado no tiene la suficiente precisión como para identificar automáticamente la posición de los grabados. De hecho, la precisión de la

medida a 50 m que aporta este modelo de sensor es de 6 mm, insuficiente para la detección de los grabados del petroglifo. A pesar de ello, se obtiene una representación tridimensional del petroglifo a partir del cual se pueden extraer otros datos importantes como ortofotos, curvas de nivel o perfiles.

Sin embargo, en trabajos previos y mediante restitución fotogramétrica, se pudieron digitalizar las líneas estructurales y obtener una nube de puntos a partir de correlación automática (CSIC, 2005). El problema en este caso es la geometría del proyecto, puesto que se tuvieron que generar tres modelos digitales por cada una de las caras y unirse posteriormente mediante transformaciones geométricas.

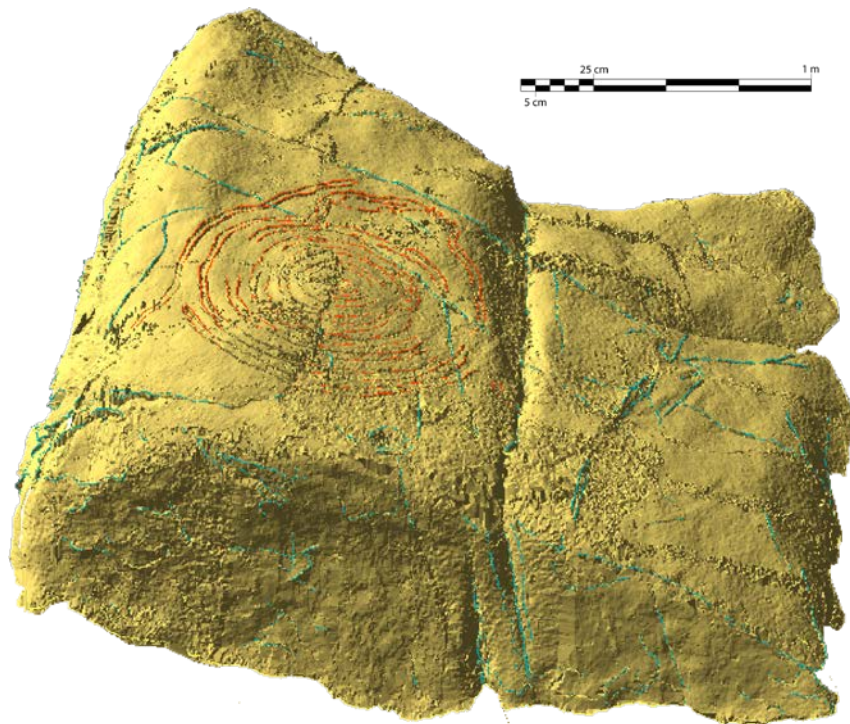


Figura 295: Modelo digital generado a partir de información restituída fotogramétricamente.

Este modelo tiene 273 mil puntos frente a los 3.6 millones que tiene el modelo registrado mediante escáner láser. Por tanto, la precisión en la medición de la superficie del petroglifo es mayor utilizando un escáner láser aunque se precisan técnicas adicionales para extraer la información vectorial de ciertas características del objeto.

A partir del modelo digital y las imágenes se puede calcular la ortofoto. A su vez, ésta puede ser utilizada como tapiz sobre el modelo digital generando imágenes evocadoras del objeto original, como la que se muestra en la siguiente figura.



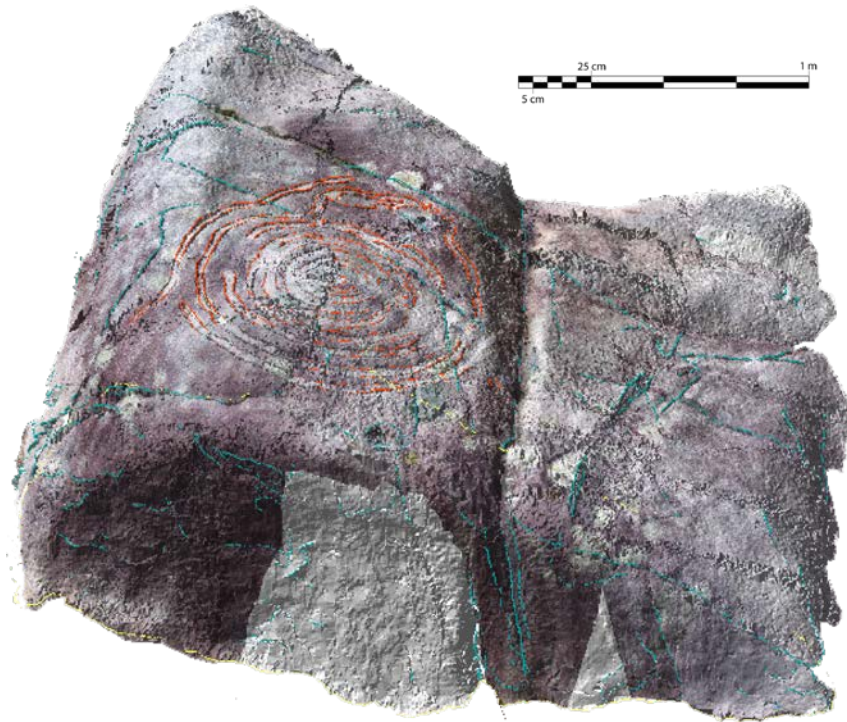


Figura 296: Modelo digital con ortofoto como tapiz.

#### 7.1.6. Láser terrestre móvil

Este ensayo consiste en el tratamiento de la información registrada por un sensor LiDAR terrestre móvil o MMS. El objetivo es mostrar las posibilidades de este sistema y comprobar que las herramientas de clasificación según morfología funcionan con este tipo de información.

El registro se realizó en Sevilla con un sistema MOMAS de la empresa GEA Cartografía. Este sistema dispone del sistema MMS Riegl VMX-250, que contiene integrados dos escáneres láser, un equipo INS/GNSS, dos cámaras digitales de 4 megapíxeles, una cámara panorámica Ladybug3 y un odómetro. Las características técnicas del equipo son las siguientes:

- Frecuencia efectiva del escáner: 600 KHz (300KHz por cada escáner).
- Campo de vista del escáner: FOV 360° (circular).
- Alcance del escáner: 200 metros (en función del tipo de superficie).
- Precisión interna del escáner: 5-10 mm.
- Densidad de puntos: 690 puntos/m<sup>2</sup> (a 10 m. y una velocidad de 50 km/h).
- Frecuencia máxima de la toma de imágenes: 7-5 imágenes/seg.

Con este sistema se realizó el registro pudiendo registrar todos los elementos anexos a la vía por donde circula el vehículo, obteniéndose puntos de la vía con una resolución de 5 cm.



Figura 297: Nube de puntos LiDAR mostrados utilizando la intensidad registrada por el sensor.

Esta información fue tratada mediante las herramientas expuestas en esta investigación y se procedió a clasificar los puntos pertenecientes al suelo, para generar el MDT, y pertenecientes a otros objetos, para generar el MDS. Para ello, se empleó el algoritmo de clasificación basado en la morfología del terreno.

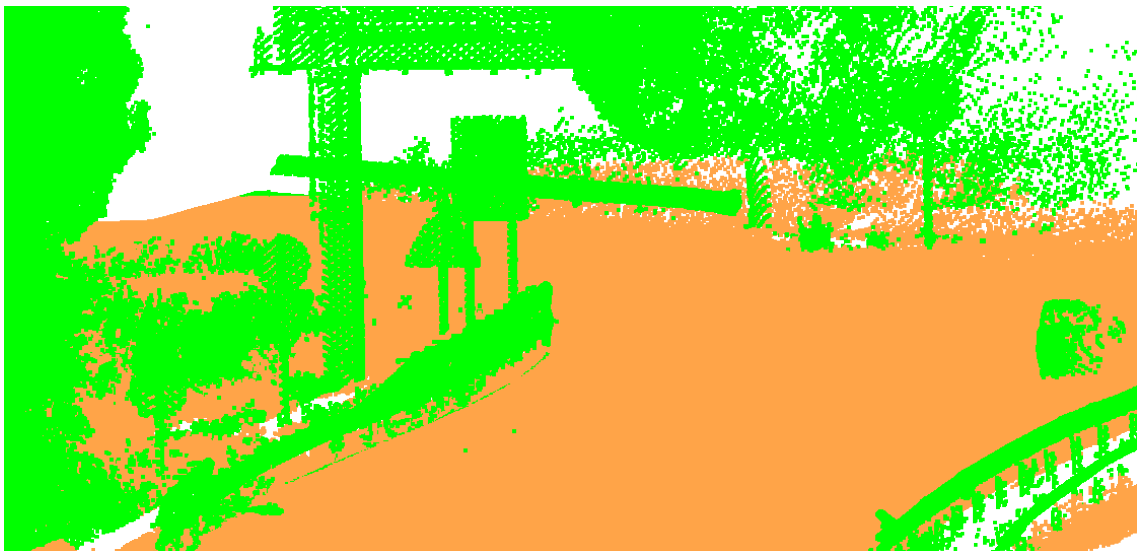


Figura 298: Nube de puntos LiDAR mostrados utilizando la clasificación calculada.

Se pudieron clasificar satisfactoriamente los objetos registrados, generando el mapa de curvas de nivel de las vías y zonas aledañas.



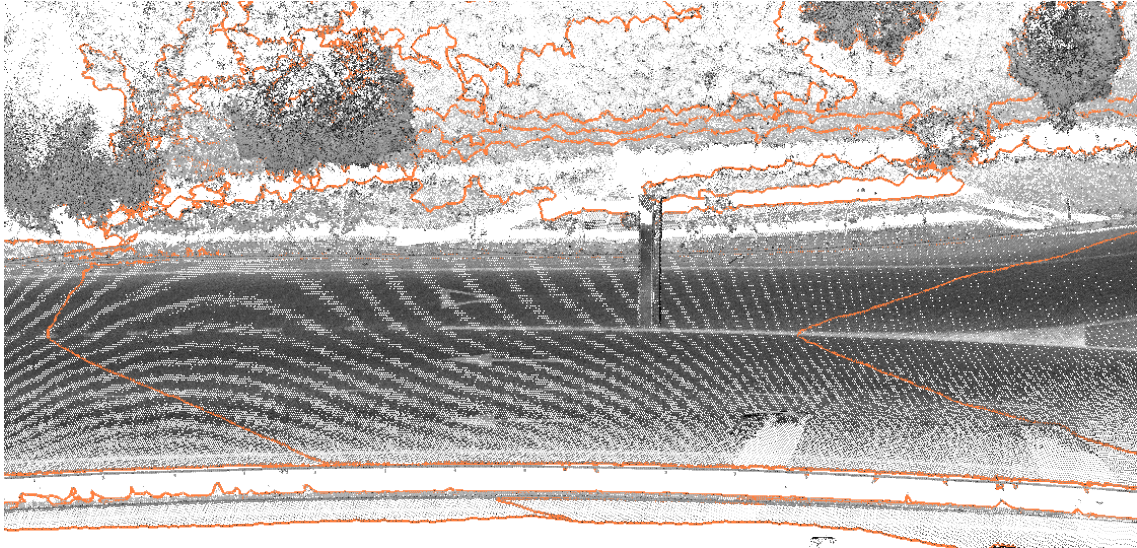


Figura 299: Nube de puntos LiDAR más curvas de nivel calculadas.

### 7.1.7. Túnel

Por último, se ha realizado un ensayo a partir del registro del interior de un túnel. Para ello, se utilizó un escáner Leica C10, realizando diferentes estacionamientos a lo largo del túnel. El objetivo es mostrar la ventaja que tienen estos sensores sobre otros sistemas de registro, que plantean dificultades en este tipo de escenarios, así como evaluar la herramienta de tetraedrización que se ha expuesto anteriormente.



Figura 300: Nube de puntos LiDAR mostrados utilizando la color en función de la altitud.

A partir de la nube de puntos registrada, se calculó la tetraedrización que permite relacionar puntos tridimensionalmente, generando los tetraedros que definen la superficie del túnel. A partir de estos tetraedros, ha sido posible calcular perfiles secuenciales para documentación del túnel así como un video con el recorrido por el interior de este.

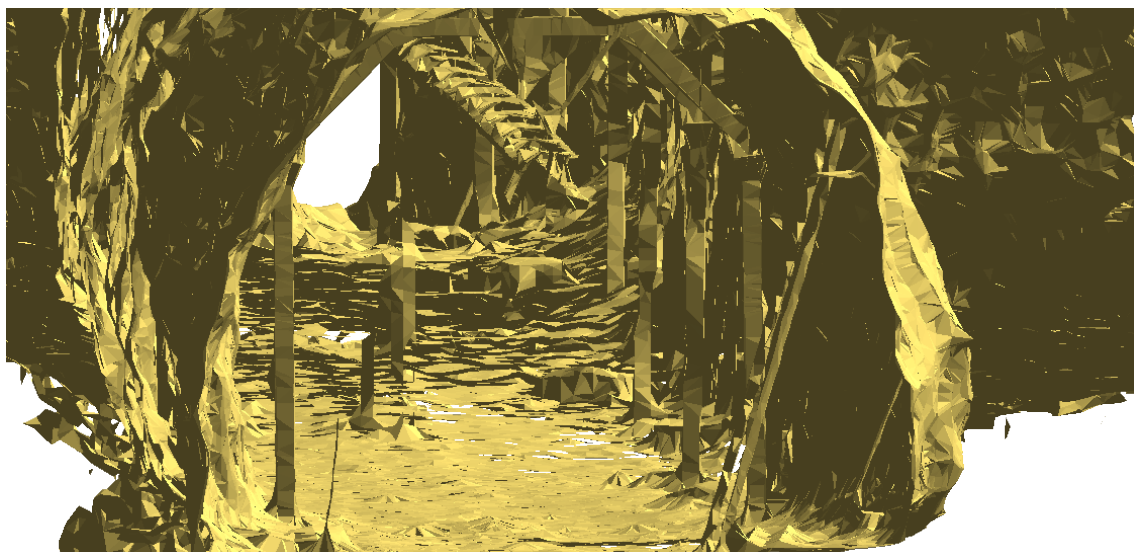


Figura 301: Modelo de tetraedros calculados a partir de la nube de puntos.

## 7.2. Evaluación con datos de referencia

### 7.2.1. Introducción

Como se ha visto en el apartado 4.2.4, existe un gran número de algoritmos de clasificación, por lo que desde la ISPRS se propuso realizar un estudio para evaluar la eficiencia de cada uno de ellos, utilizando datos significativos de varias zonas, tanto rústicas como urbanas, de la superficie terrestre. Con ello, se consiguen extraer unos parámetros objetivos de comportamiento en función de las situaciones planteadas. Las pruebas fueron realizadas utilizando ocho algoritmos en el año 2003 (en esta tesis se ha añadido uno más), publicando posteriormente los resultados (Sithole & Vosselman, 2003). Hoy en día, sirve como una excelente referencia para evaluar la eficiencia de un algoritmo de clasificación de puntos LiDAR.

Los objetivos de estas pruebas de evaluación son principalmente tres:

- Comparar el algoritmo con los resultados de otros algoritmos existentes, determinando cuáles son los mejores y peores escenarios de actuación.
- Determinar los resultados del algoritmo en función de diferentes densidades de puntos, de tal manera que se pueda determinar cuál es la densidad más adecuada de actuación, lo cual determinará en gran medida el coste de un levantamiento utilizando técnicas LiDAR y el grado de definición del modelo generado.
- Determinar las zonas y casuística donde el algoritmo tiene mayores problemas para darle solución en futuras investigaciones.

En total se van a utilizar quince conjuntos diferentes de datos distribuidos en siete zonas diferentes. Los datos de referencia proceden de una clasificación supervisada utilizando imágenes aéreas y publicados en la dirección electrónica [www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest/index.html](http://www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest/index.html). Se procesará cada zona de forma automática y los resultados serán comparados con los datos de referencia, obteniendo unos indicadores de eficiencia. Estos indicadores señalarán aquellos puntos correctamente clasificados o no como suelo u objeto. Las imágenes que posteriormente se muestran, contienen los puntos suelo correctos (color verde), los puntos objeto correctos (color amarillo), los puntos suelo incorrectos (color rojo) y los puntos objeto incorrectos (color azul). Con la distribución de estos puntos se podrán resaltar las fortalezas o debilidades del algoritmo.

Para poder generar unos parámetros objetivos de comparación, se calcularon unos indicadores en función de la eficiencia en la clasificación de ambos tipos de elementos, mediante las fórmulas:

$$e_I = \frac{b}{a+b} \quad e_{II} = \frac{c}{c+d} \quad e_T = \frac{b+c}{a+b+c+d}$$

$a$  = Puntos suelo correctamente clasificados

$b$  = Puntos suelo incorrectamente clasificados

$c$  = Puntos objeto incorrectamente clasificados

$d$  = Puntos objeto correctamente clasificados

$e_I$  = Indicador de error en la detección de puntos de suelo

$e_{II}$  = Indicador de error en la detección de puntos objeto

$e_T$  = Indicador de error en la detección del total de puntos

Con estos parámetros se han construido tablas para el cálculo de la efectividad en la clasificación de cada zona. En estas tablas también se han incluido los puntos que no se han clasificado o que no tienen correspondencia entre el fichero original y el fichero modificado (NC en la tabla).

Los datos originales contenían puntos de primer y segundo eco, almacenados en archivos ASCII. Los datos de referencia contenían puntos en un archivo ASCII donde se especificaba si el punto era suelo u objeto. Todos los algoritmos dejaron un porcentaje de puntos sin clasificar debido a la incertidumbre que presentaban. A continuación, se exponen las características de los resultados obtenidos en cada una de las zonas de estudio.

## 7.2.2. Pruebas realizadas

### 7.2.2.1. Zona 1

Se trata de una zona urbana, con un espaciado entre puntos entre 1 y 1.5 m. En esta zona se presentan pendientes escalonadas, mezcla de vegetación y edificación en las colinas, edificaciones en pendientes y huecos entre los datos. Se han realizado dos zonas de ensayo.

Tabla 24: Resultados obtenidos para la zona 1.

Zona	Objetos		Suelo		Sin clasif.	Total	Indicadores (%)		
	Bien	Mal	Bien	Mal			Suelo	Objetos	Total
11	15478	579	15808	5795	350	38010	26.82	3.61	16.93
12	23978	993	25849	736	563	52119	2.77	3.98	3.35

La primera zona muestra una complicada colina sembrada de árboles con casas individuales entremezcladas. Se muestran igualmente diferentes pendientes ya que existe una importante pendiente al NW de la zona y una zona llana en el sur. La mayoría de los problemas se han dado en puntos de suelo clasificados como objetos en la zona arbolada de pendiente.



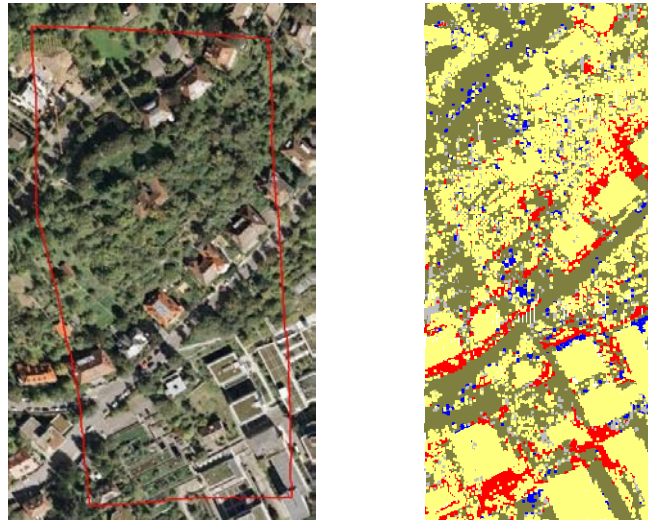


Figura 302: Resultados gráficos para la zona 11.

El segundo ensayo es una zona llana urbana con edificaciones de forma irregular. Se presentan pocos problemas sobre objetos, siendo mayores los ocurridos sobre puntos de objetos clasificados como terreno. Estos puntos corresponden a puntos aislados de mobiliario urbano tomados como suelo.

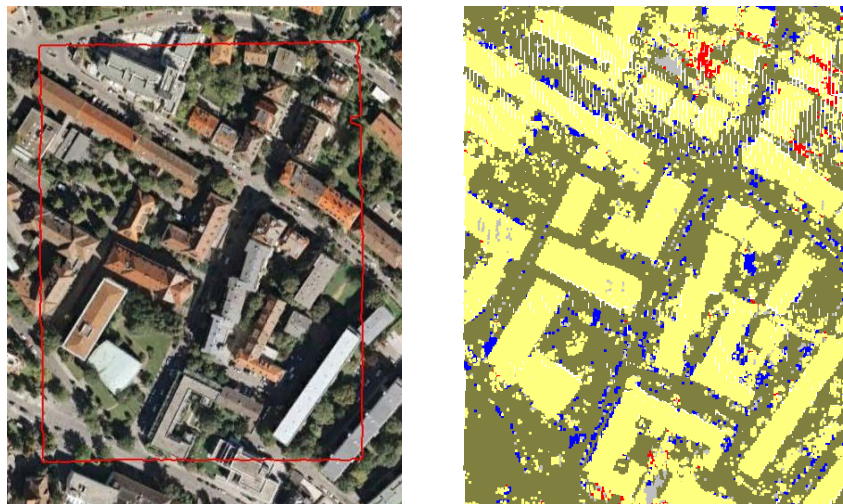


Figura 303: Resultados gráficos para la zona 12.

#### 7.2.2.2. Zona 2

Se trata de una zona urbana, con un espaciado entre puntos entre 1 y 1.5 m. En esta zona se presentan grandes edificios, edificios con formas irregulares y una carretera con un puente y un pequeño túnel. Existen huecos entre los datos. Se han realizado cuatro zonas de ensayo.

Tabla 25: Resultados obtenidos para la zona 2.

Zona	Objetos		Suelo		Sin clasif.	Total	Indicadores (%)		
	Bien	Mal	Bien	Mal			Suelo	Objetos	Total
21	2544	179	10047	2	188	12960	0.02	6.57	1.42
22	9390	590	21422	948	356	32706	4.24	5.91	4.75
23	11334	339	9528	3637	257	25095	27.63	2.90	16.01
24	1849	114	4963	415	151	7492	7.72	5.81	7.21

El primer caso contempla un paso a nivel por encima de una carretera. Los puentes, pasos a nivel y rampas tienen una dificultad añadida en su identificación porque no todos sus puntos están elevados sobre el terreno desnudo. Están adosados al terreno, presentando elevación en algunas caras de su forma. La duda para todos los algoritmos está en dónde empieza y termina un puente. A este respecto, el algoritmo no ha tenido un mal comportamiento, generando problemas en una de las colas del puente, identificando como puente puntos que ya pertenecían al suelo.

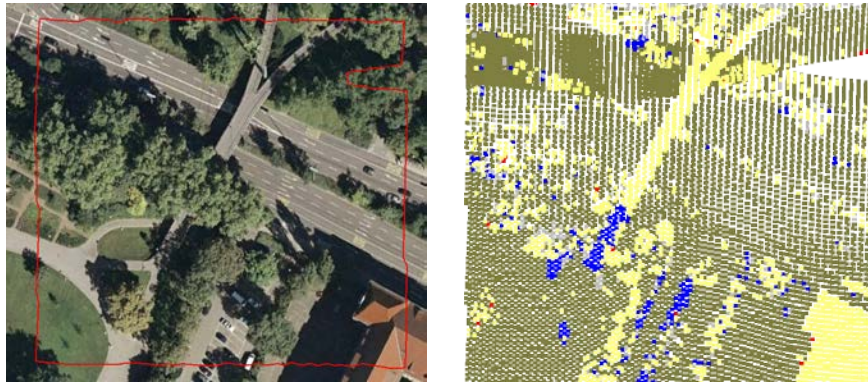


Figura 304: Resultados gráficos para la zona 21.

En la segunda zona de ensayo, ocurre un caso parecido pero con un túnel. El algoritmo lo identifica, produciendo problemas en puntos de suelo identificados erróneamente como objetos.

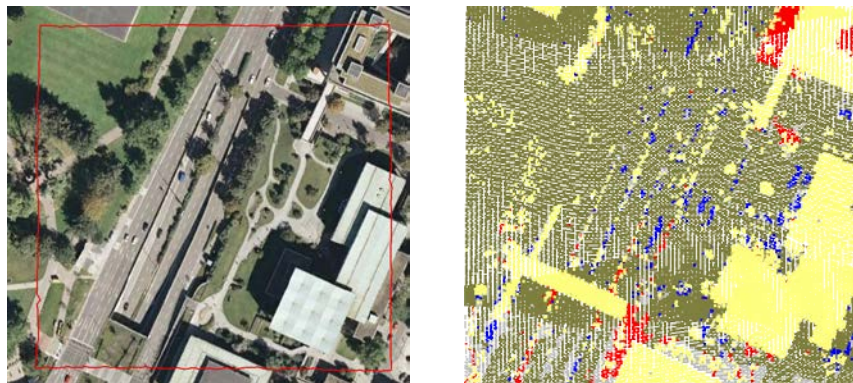


Figura 305: Resultados gráficos para la zona 22.



El tercer caso muestra una morfología urbana compleja representada por un centro comercial con rampas y una zona central hundida por donde se puede pasear. De hecho, el criterio seguido por la ISPRS para definir suelo desnudo es que se pueda acceder caminando, por lo que consideraron que las rampas son suelo. El algoritmo, al estar elevadas dichas rampas sobre el resto de suelo circundante, ha interpretado todo el conjunto (excepto la zona central) como una edificación, produciéndose un alto porcentaje de error, quizás justificable.

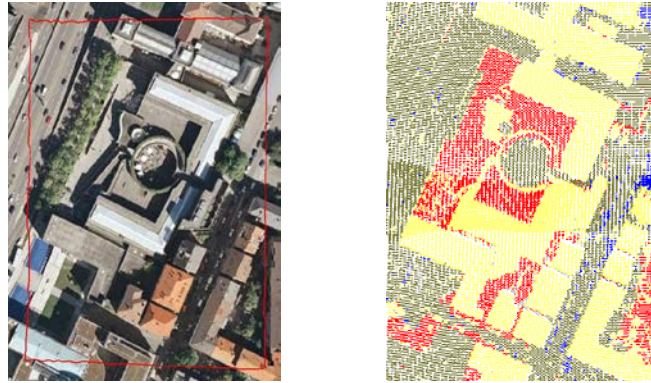


Figura 306: Resultados gráficos para la zona 23.

Por último, la cuarta zona de ensayo muestra una rampa entre árboles que dificulta su identificación. Dicha rampa debería haber sido contemplada como suelo y el algoritmo la ha clasificado como objeto incorrectamente.

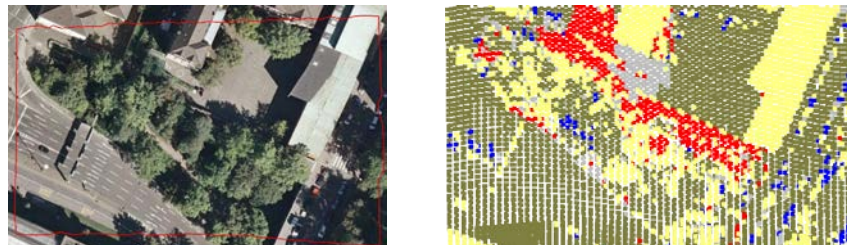


Figura 307: Resultados gráficos para la zona 24.

### 7.2.2.3. Zona 3

Se trata de una zona urbana, con un espaciado entre puntos entre 1 y 1.5 m. Esta zona tiene una gran densidad de edificación con árboles entre los edificios, tejados irregulares y espacios abiertos con elementos bajos y altos mezclados. También existen huecos.

Tabla 26: Resultados obtenidos para la zona 3.

Zona	Objetos		Suelo		Sin clasif.	Total	Indicadores (%)		
	Bien	Mal	Bien	Mal			Suelo	Objetos	Total
31	12376	550	15518	12	406	28862	0.08	4.25	1.97

A la vista de los resultados numéricos obtenidos, el algoritmo apenas ha tenido dificultad en la correcta clasificación de los puntos de esta zona. Se produjeron problemas en vegetación baja, coches o mobiliario urbano, clasificados como suelo.

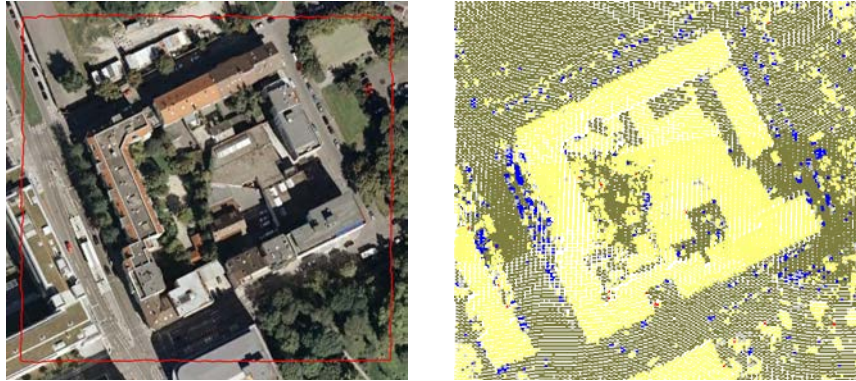


Figura 308: Resultados gráficos para la zona 31.

#### 7.2.2.4. Zona 4

Se trata de una zona urbana, con un espaciado entre puntos entre 1 y 1.5 m. Esta zona está centrada sobre una estación de trenes con baja densidad de puntos. También existen huecos entre los puntos. Se han realizado dos zonas de ensayo.

Tabla 27: Resultados obtenidos para la zona 4.

Zona	Objetos		Suelo		Sin clasif.	Total	Indicadores (%)		
	Bien	Mal	Bien	Mal			Suelo	Objetos	Total
41	5435	161	4688	724	223	11231	13.38	2.88	8.04
42	29635	131	11253	895	556	42470	7.37	0.44	2.45

La primera zona incluye puntos erróneamente medidos por haber reflejado sobre superficies pulidas que ha provocado que el algoritmo los clasifique incorrectamente.

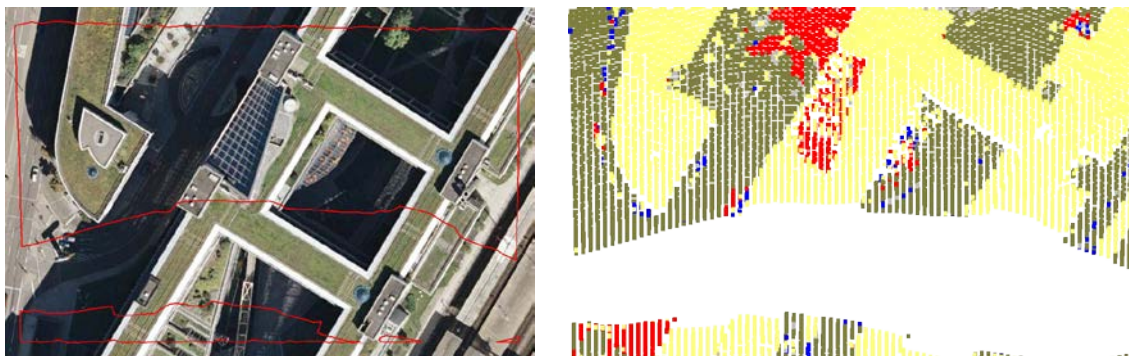


Figura 309: Resultados gráficos para la zona 41.

La segunda zona muestra los andenes y raíles de la entrada a la estación de ferrocarril. Ambas están ligeramente elevadas respecto del suelo circundante, por lo que el algoritmo ha cometido algunos errores en la identificación de los raíles como suelo. Una segunda causa de estos errores es la estrecha banda de suelo desnudo que representan dichos raíles entre los andenes lo que ha dificultado su identificación.

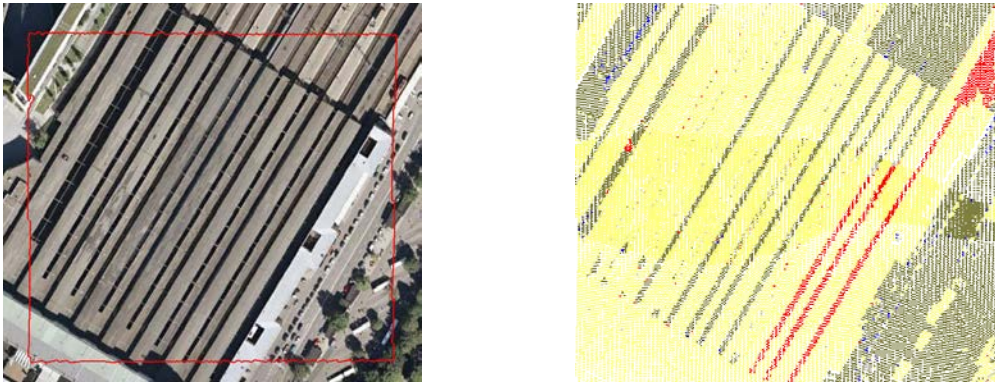


Figura 310: Resultados gráficos para la zona 42.

#### 7.2.2.5. Zona 5

Se trata de una zona rural, con un espaciado entre puntos entre 2 y 3.5 m. Esta zona tiene pendientes escalonadas, una cantera a cielo abierto y vegetación a orillas de un río. Existen huecos entre los datos. Se han realizado cuatro ensayos.

Tabla 28: Resultados obtenidos para la zona 5.

Zona	Objetos		Suelo		Sin clasif.	Total	Indicadores (%)		
	Bien	Mal	Bien	Mal			Suelo	Objetos	Total
51	3628	203	13794	116	104	17845	0.83	5.30	1.80
52	2056	280	17345	2616	177	22474	13.11	11.99	12.99
53	1139	206	29830	3035	168	34378	9.23	15.32	9.47
54	4428	157	3816	145	62	8608	3.66	3.42	3.53

Las dos primeras zonas de ensayo tienen pendientes escalonadas con vegetación que dificultan la clasificación. En el primer caso, se trata de la orilla de un río con vegetación y el algoritmo ha tenido un buen comportamiento generando pocos problemas, sobre todo en la identificación del suelo.



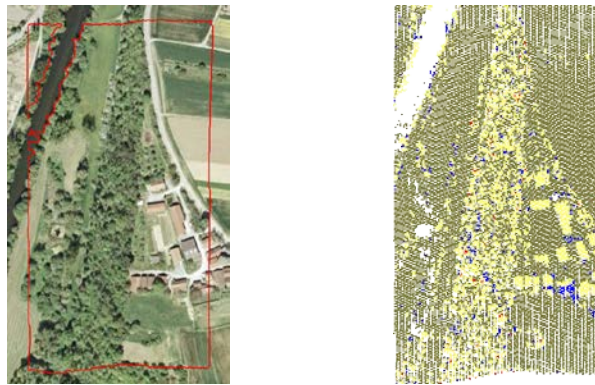


Figura 311: Resultados gráficos para la zona 51.

En el segundo caso, se han producido problemas en la identificación del suelo en la parte superior de la pendiente por la presencia de arbolado, que ha llevado al algoritmo a interpretar incorrectamente suelo como objetos.

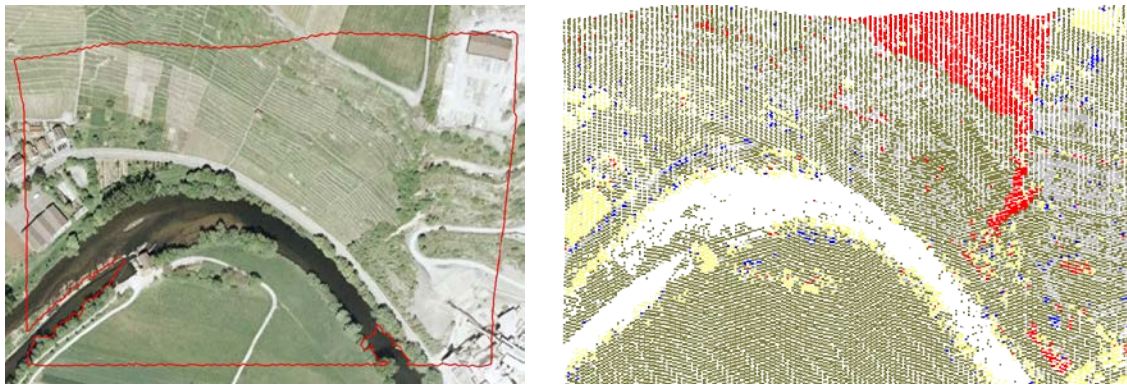


Figura 312: Resultados gráficos para la zona 52.

El tercer caso incluye el registro de una cantera a cielo abierto, presentándose discontinuidades en el registro del suelo que ha provocado errores en el principio y fin de dichas discontinuidades.

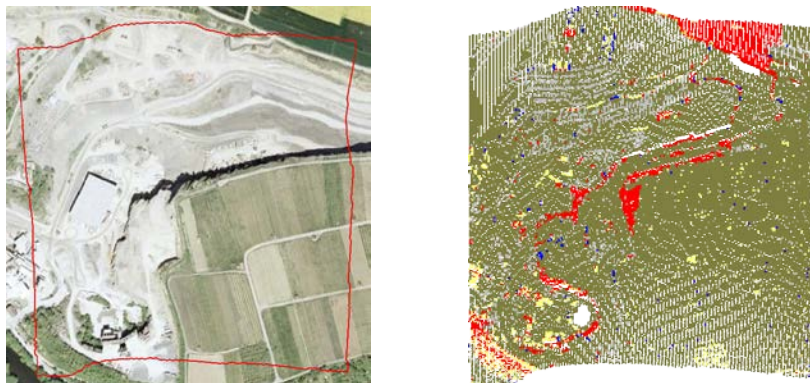


Figura 313: Resultados gráficos para la zona 53.

La cuarta zona representa una zona residencial de viviendas unifamiliares, comportándose de forma óptima el algoritmo, produciéndose pocos problemas.

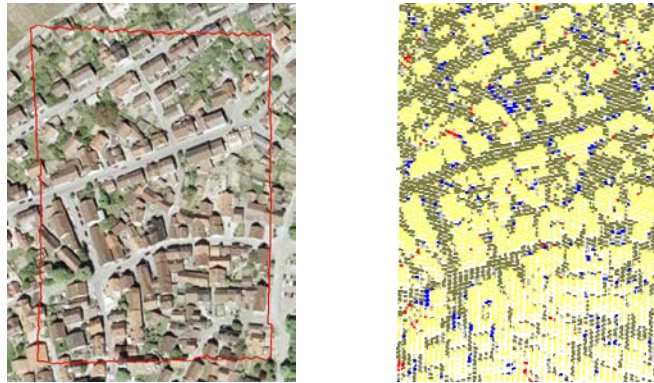


Figura 314: Resultados gráficos para la zona 54.

#### 7.2.2.6. Zona 6

Se trata de una zona rural, con un espaciado entre puntos entre 2 y 3.5 m. Esta zona tiene grandes edificaciones y una carretera con taludes. Existen huecos entre los datos.

Tabla 29: Resultados obtenidos para la zona 6.

Zona	Objetos		Suelo		Sin clasif.	Total	Indicadores (%)		
	Bien	Mal	Bien	Mal			Suelo	Objetos	Total
61	1140	47	32563	1239	71	35060	3.67	3.96	3.68

La zona de ensayo se ha fijado en una carretera a orillas de un río. Se han producido pocos problemas y básicamente se han concentrado en la identificación de puntos de suelo en los taludes de las orillas del río, debido a la pendiente de los propios taludes y la presencia de vegetación en la zona.

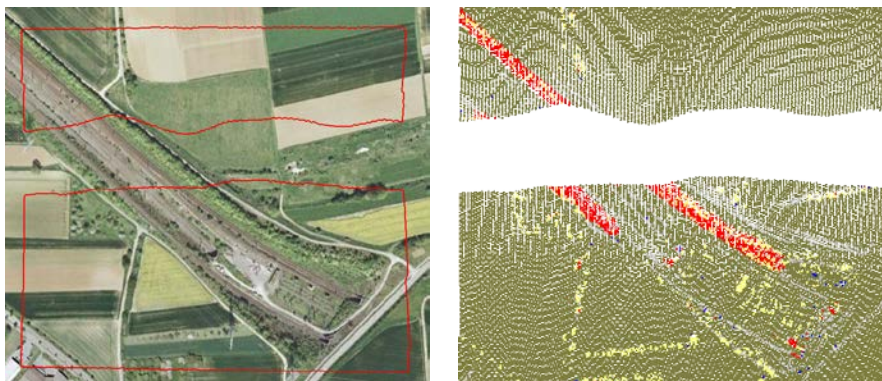


Figura 315: Resultados gráficos para la zona 61.

### 7.2.2.7. Zona 7

Se trata de una zona rural, con un espaciado entre puntos entre 2 y 3.5 m. Esta zona tiene fundamentalmente un puente y una carretera con taludes que pasa por debajo de él. Existen huecos entre los datos.

Tabla 30: Resultados obtenidos para la zona 7.

Zona	Objetos		Suelo		Sin clasif.	Total	Indicadores (%)		
	Bien	Mal	Bien	Mal			Suelo	Objetos	Total
71	1652	73	13478	326	116	15645	2.36	4.23	2.57

Al igual que los ensayos en la zona 2, esta zona representa un puente sobre una autopista. Los errores, por tanto, se han producido en la identificación de puntos de suelo como objetos en los extremos del puente.

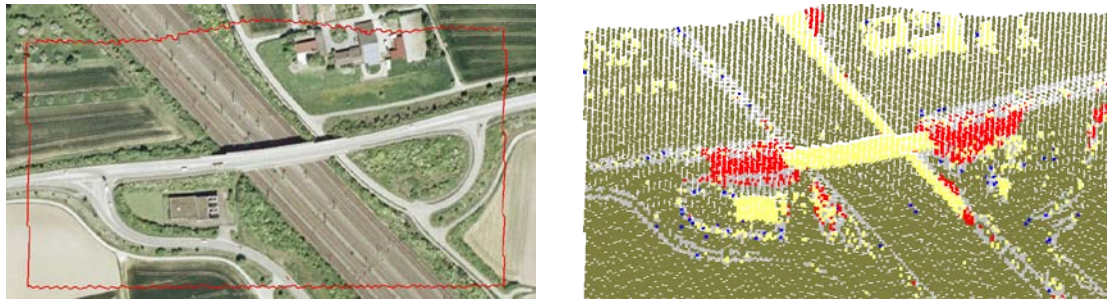


Figura 316: Resultados gráficos para la zona 71.

### 7.2.2.8. Resumen

En líneas generales, el algoritmo ha presentado un buen comportamiento en la identificación de suelo y objetos en las zonas de ensayo, algunas de las cuales tenían una gran dificultad debido a las estructuras que en ellas se presentaban.

Cabe destacar que el algoritmo se comporta mejor en la identificación de puntos de suelo que en la de objetos, sobre todo si estos tienen una baja altura o se presentan sobre taludes. Ha resuelto con buenos resultados objetos complicados como son los adosados: puentes, pasos a nivel o rampas. No ha habido dificultad en la identificación de edificaciones o arbolado en ningún caso. El porcentaje de puntos sin clasificar ha sido inferior al 1%.

Se obtiene un porcentaje de acierto total del 93.4%.



Tabla 31: Resultados obtenidos en todas las zonas.

Zona	Objetos		Suelo		Sin clasif.	Total	Indicadores (%)		
	Bien	Mal	Bien	Mal			Suelo	Objetos	Total
11	15478	579	15808	5795	350	38010	26.82	3.61	16.93
12	23978	993	25849	736	563	52119	2.77	3.98	3.35
21	2544	179	10047	2	188	12960	0.02	6.57	1.42
22	9390	590	21422	948	356	32706	4.24	5.91	4.75
23	11334	339	9528	3637	257	25095	27.63	2.90	16.01
24	1849	114	4963	415	151	7492	7.72	5.81	7.21
31	12376	550	15518	12	406	28862	0.08	4.25	1.97
41	5435	161	4688	724	223	11231	13.38	2.88	8.04
42	29635	131	11253	895	556	42470	7.37	0.44	2.45
51	3628	203	13794	116	104	17845	0.83	5.30	1.80
52	2056	280	17345	2616	177	22474	13.11	11.99	12.99
53	1139	206	29830	3035	168	34378	9.23	15.32	9.47
54	4428	157	3816	145	62	8608	3.66	3.42	3.53
61	1140	47	32563	1239	71	35060	3.67	3.96	3.68
71	1652	73	13478	326	116	15645	2.36	4.23	2.57
Total	126062	4602	229902	20641	3748	384955	8.24	3.52	6.62

### 7.2.3. Comparativas con otros algoritmos

El proyecto presentado originalmente por la ISPRS incluía ocho algoritmos publicando los resultados obtenidos con ellos. Estos resultados han sido utilizados para tener además datos relativos con ellos. Además se han incluido los resultados obtenidos con el algoritmo OBA (Yan, et al., 2012). Por tanto, los algoritmos contemplados en la comparación son:

- Elmqvist (Elmqvist, 2001), basado en curvas de nivel activas. Utiliza los datos dispuestos en rejilla y rellena posibles huecos.
- Sohn (Sohn & Dowman, 2002), basado en un método de regularización.
- Axelsson (Axelsson, 2001), basado en una densificación progresiva de un TIN.
- Pfeifer (Pfeifer & Stadler, 2001), basado en una interpolación robusta jerárquica.
- Brovelli (Brovelli, et al., 2002), basado en interpolación mediante splines. Utiliza los datos dispuestos en rejilla. Utiliza el segundo pulso, no es iterativo y rellena posibles huecos.

- Roggero (Roggero, 2002), basado en un método de pendiente modificada.
- Wack (Wack & Wimmer, 2002), basado en la modificación jerárquica de bloques. Utiliza los datos dispuestos en rejilla.
- Sithole (Sithole, 2001), basado en un método de pendiente modificada. No es iterativo.
- OBA (Yan, et al., 2012), basado en un método de pendientes a partir de mínimos locales. Utiliza los datos dispuestos en rejilla.
- Arranz (propuesto en la presente tesis), basado en una densificación progresiva del TIN, utilizando splines para la detección de puntos. Utiliza el segundo pulso.

El primer gráfico muestra la comparación de los errores producidos en la identificación de puntos suelo. El rango está entre 0% y 92%. Como se puede apreciar, el algoritmo propuesto en este documento obtiene unos buenos resultados relativos, siendo el que mejor se comporta hasta en cinco ensayos. En el caso 23 se presentan los peores resultados, por el criterio seguido en la identificación de puntos suelo expuesta anteriormente. El algoritmo aquí propuesto es el que obtiene mejores resultados hasta en tres ocasiones (casos 12, 21 y 31).

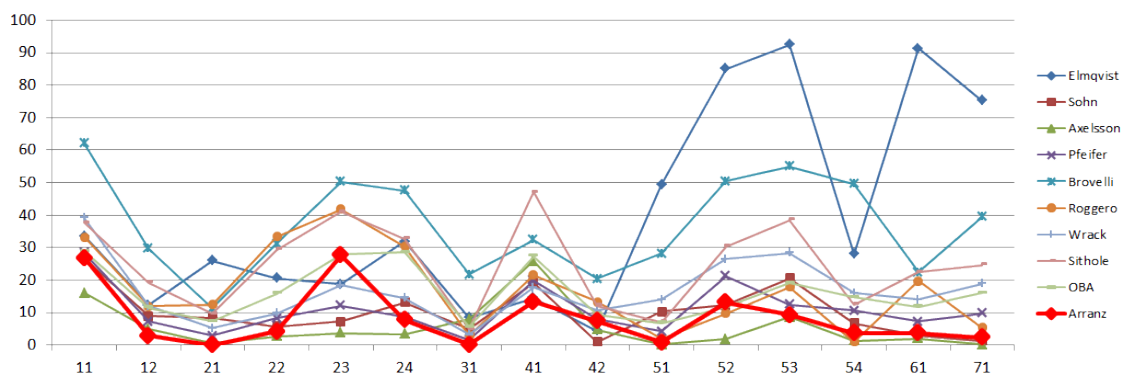


Figura 317: Comparativa entre algoritmos en los errores cometidos al identificar puntos suelo.

El segundo gráfico muestra la comparación de los errores producidos en la identificación de puntos objeto. En este caso, el rango está entre 0% y 19%. Aunque los resultados absolutos son bajos comparados con la identificación de puntos suelo, desde el punto de vista relativo, el algoritmo propuesto podría mejorar en varios casos.

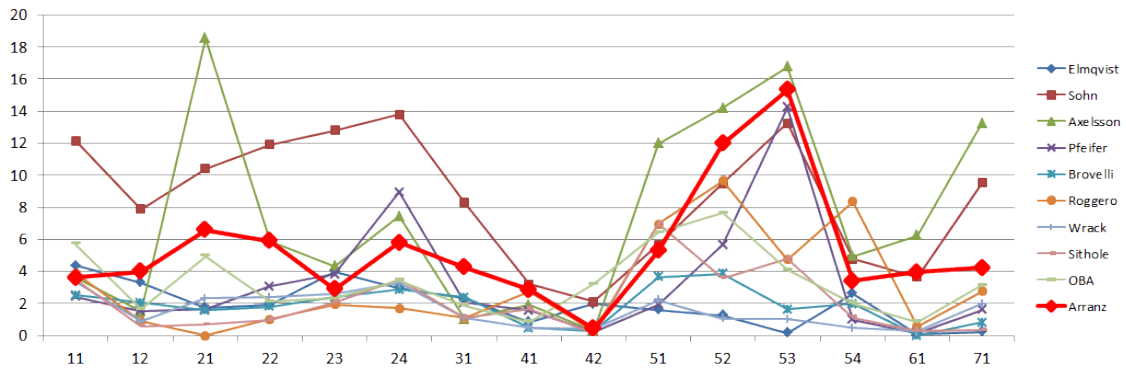


Figura 318: Comparativa entre algoritmos en los errores cometidos al identificar puntos objeto.

El tercer gráfico muestra la comparación de los errores producidos para el conjunto total de puntos. En este caso, el rango está entre 2% y 58%. Debido a que la mayor parte de los puntos son suelo, el gráfico comparativo es similar al ofrecido en primer lugar. El algoritmo propuesto se mantiene entre aquellos que cometen menos errores, exceptuando el caso 23. De hecho, es el que obtiene mejores resultados hasta en cuatro ocasiones (casos 21, 31, 41 y 51).

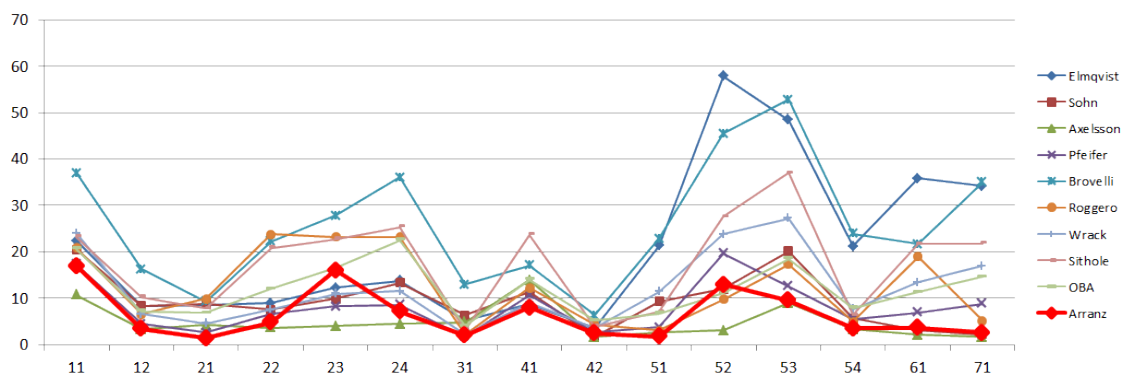


Figura 319: Comparativa entre algoritmos en los errores cometidos al identificar puntos.

Por último, se muestra un gráfico con los valores medios obtenidos en todas las pruebas, ordenado de izquierda a derecha según el menor error cometido en el global de los puntos. Como puede apreciarse, el algoritmo propuesto ocupa una meritoria segunda posición, mostrando unos porcentajes de error equilibrados entre puntos suelo y objeto (sólo comparables a los resultados de Axelsson o Sohn). Es curioso el resultado de aquellos algoritmos que cometen bajos errores en la identificación de puntos objeto pero elevados en puntos suelo, lo que les penaliza por su peso en el conjunto global.

Asimismo, se muestran tres líneas con la media total de todos los algoritmos: el indicador de suelo (color azul) y cuyo valor es 18.4%, el indicador de objetos (color rojo) y cuyo valor es 3.8% y el indicador total (color verde) y cuyo valor es 12.8%.

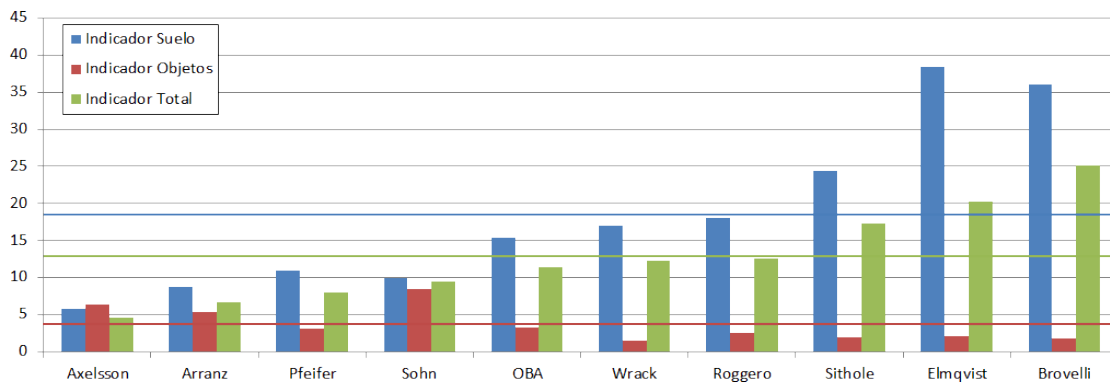


Figura 320: Comparativa entre algoritmos, ordenados de izquierda a derecha, de menor a mayor error total en la clasificación de puntos.

## 7.2.4. Conclusiones

Apoyándose en estas numerosas pruebas con datos objetivos de referencia y en la comparación con reconocidos algoritmos para clasificación de puntos LiDAR, se puede afirmar que, en la presente tesis, se presenta un nuevo algoritmo para clasificación con óptimos resultados. Se ha desarrollado un proceso que pone atención tanto en la clasificación de puntos pertenecientes al suelo desnudo como a objetos sobre la superficie (edificios, vegetación, puentes, líneas eléctricas y otras estructuras). De hecho, los indicadores de eficiencia de ambos son similares, generando un indicador de eficiencia total superior al 93.4%, ocupando una digna segunda posición en la comparación realizada.

Es destacable el buen comportamiento en la detección de puntos pertenecientes al suelo desnudo y un posible margen de mejora en la detección de objetos. No obstante, corregir errores producidos en objetos es más sencillo que corregir los errores producidos en puntos suelo, debido a su menor ocurrencia y a que suelen destacar respecto a su entorno, por lo que son fácilmente detectables.

Sería conveniente, en un futuro, realizar más pruebas objetivas con datos de referencia en la línea de la ofrecida por la ISPRS pero con más parámetros y actualizados, como pueden ser la velocidad de proceso o la categorización de los objetos detectados, ámbitos en los que se ha trabajado en el desarrollo de algoritmos de este documento.



# Discusión de resultados

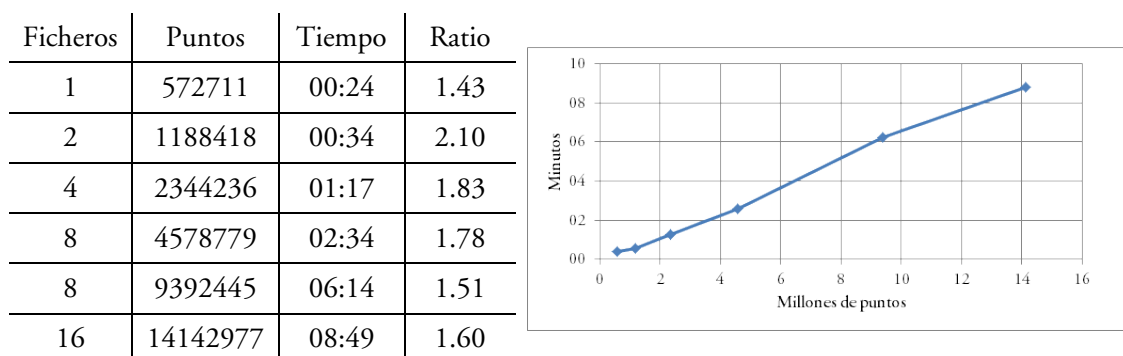
## 8.1. Algoritmos propuestos

### 8.1.1. Modelado

A lo largo del capítulo 5, se han esbozado numerosos algoritmos para el tratamiento, edición y gestión de datos procedentes de sensores LiDAR, tanto aéreos como terrestres. Los algoritmos de modelado, tanto en 2.5D mediante la triangulación de Delaunay como en 3D mediante la tetraedrización de Delaunay, se consideran fundamentales en el resto de desarrollos. Estos algoritmos proporcionan una forma de calcular las relaciones de puntos “vecinos” en el espacio. A partir de estas relaciones, es posible establecer condiciones que permitan segmentar, clasificar o agrupar la información geométrica. Por ello, se han propuesto dos algoritmos que permiten calcular estas relaciones de forma rápida.

Para comprobar la bondad del algoritmo de triangulación, se han realizado ensayos con ficheros de puntos procedentes de un vuelo LiDAR. Las pruebas han consistido en triangular diferentes volúmenes de información para comprobar la dependencia del algoritmo respecto del número de puntos, obteniéndose los resultados que muestran la siguiente tabla y gráfico.

Tabla 32: Resultados obtenidos en el algoritmo de triangulación.



Gracias a un planteamiento basado en la subdivisión lógica de los datos mediante *quadtrees* y a una programación de los cálculos que permita ejecutar varios hilos de ejecución, se han obtenido unas velocidades óptimas, de aproximadamente 1.7 millones de puntos triangulados por minuto. Estas velocidades permitirán posteriormente utilizar el algoritmo para establecer las relaciones de vecindad de forma rápida. Por tanto, se dispone

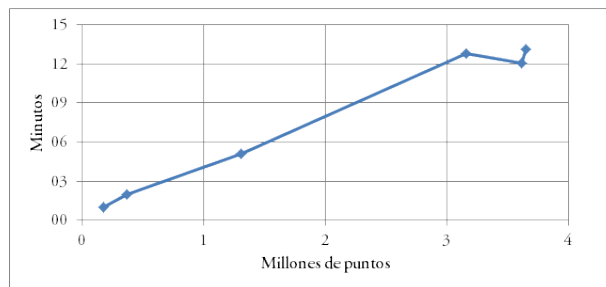


de una herramienta de gran interés práctico para la toma de decisiones en modelado de datos, haciendo posibles algunos de los algoritmos y herramientas que se han propuesto, cuyos cálculos se basan en las relaciones obtenidas mediante una triangulación.

Análogamente, se han realizado ensayos con ficheros de puntos procedentes de diferentes proyectos TLS que contenían distribuciones espaciales y cantidades de puntos diferentes para comprobar la bondad del algoritmo de tetraedrización, obteniéndose los resultados que muestran la siguiente tabla y gráfico.

Tabla 33: Resultados obtenidos en el algoritmo de tetraedrización.

Ficheros	Puntos	Tiempo	Ratio
1	179533	00:58	0.19
2	368628	01:58	0.19
3	1306534	05:07	0.26
4	3160611	12:49	0.25
5	3614569	12:04	0.30
6	3648344	13:08	0.28



La velocidad obtenida es menor que en el algoritmo anterior debido al aumento en la cantidad de cálculos necesarios. Aun así, se han obtenido unas velocidades óptimas de aproximadamente 250 mil puntos por minuto. Este algoritmo permitirá calcular las relaciones de vecindad en nubes de puntos tridimensionales para realizar cálculos de ortofotos, curvados, perfiles, etc.

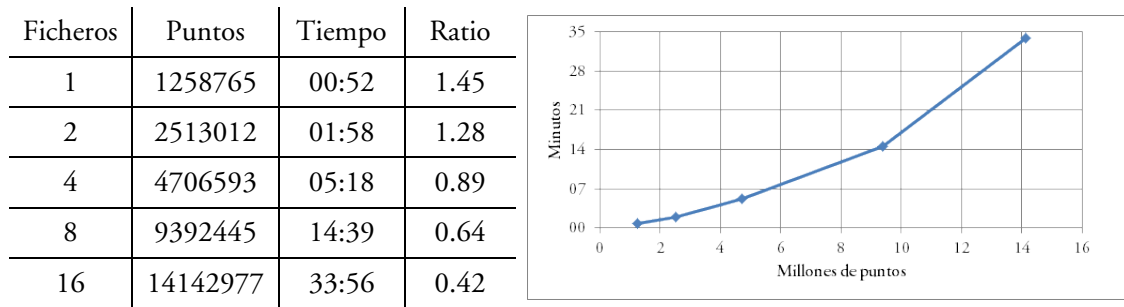
### 8.1.2. Clasificación

A partir de las relaciones generadas entre los puntos por la triangulación 2D y considerando diversas características de la información LiDAR se ha desarrollado una batería de algoritmos que permite clasificar los puntos en función del objeto medido. Cada uno de ellos tiene ventajas y desventajas, funcionando mejor en unos escenarios que en otros. Algunos de estos algoritmos consideran parámetros útiles y particulares de la documentación del patrimonio como la catalogación de materiales utilizando propiedades radiométricas del objeto.

Inicialmente, se ha propuesto un algoritmo que permite clasificar puntos en función de su posición con respecto a su entorno, es decir, considerando la geometría generada por las relaciones de vecindad. Al igual que anteriormente, se han realizado pruebas con ficheros de puntos procedentes de un vuelo LiDAR, con archivos con diferentes cantidades de puntos para conocer la bondad del algoritmo.

Se llegan a clasificar 14 millones de puntos en 34 minutos, aproximadamente, como se aprecia en los resultados obtenidos en la siguiente tabla:

Tabla 34: Resultados obtenidos en el algoritmo de clasificación en función de la geometría.



Los resultados obtenidos son satisfactorios, pero el algoritmo presenta algunas carencias. El hecho de utilizar únicamente geometría para detectar objetos permite discriminar la información perteneciente al terreno de los objetos que se sitúan sobre él, pero prácticamente no permite caracterizarlos. Para mejorar los resultados se han propuesto varias soluciones.

Una de ellas está basada en un proceso posterior que permite diferenciar entre edificaciones y vegetación. Se han realizado ensayos en zonas urbanas y se han obtenido resultados óptimos, diferenciando un alto porcentaje de este tipo de objetos. El algoritmo está basado en la detección de los puntos pertenecientes a las fachadas de los edificios y a las cubiertas, calculando la superficie que forma el conjunto de puntos “vecinos”.

Otra solución se fundamenta en la utilización de la información radiométrica contenida en cada punto. Para ello, es posible utilizar la intensidad registrada originalmente por el sensor láser. Los resultados obtenidos no han sido muy alentadores, mostrándose carencias en la caracterización de objetos sobre todo en entornos urbanos. En entornos rústicos, los resultados han sido positivos, sobre todo en la detección de vegetación.

También, se puede utilizar información multispectral recogida por otro sensor, por ejemplo, una cámara fotográfica. Para ello, ha sido necesario desarrollar los algoritmos necesarios para incorporar esta información a la nube de puntos LiDAR, que puede ser muy variada. Se han realizado ensayos tanto con información LiDAR aérea como terrestre y sus resultados dependen del poder de resolución de las cámaras.

Además, derivados de estas ideas, se han propuesto dos algoritmos adicionales utilizando la información geométrica conjuntamente con la intensidad o el color, mejorando los resultados generados utilizando únicamente la información radiométrica.

Por otro lado, aprovechando la forma de registrar de los sensores LiDAR aéreos, se ha propuesto un algoritmo que clasifica los puntos considerando que estos están dispuestos como si de un perfil se tratara. El algoritmo es muy rápido y los resultados son buenos, permitiendo generar una clasificación a priori antes de ser abordada de manera más exhaustiva por los algoritmos anteriormente comentados.

Como complemento a estas herramientas, también se han esbozado tres algoritmos diferentes para localizar puntos medidos de forma incorrecta. Estos algoritmos permiten filtrar el archivo de errores groseros.

Este conjunto de algoritmos expuestos está formado por once algoritmos diferentes, sin contar los necesarios para incorporar la información multispectral a la nube de puntos. Su elevado número permite tener un amplio abanico de posibilidades para tratar la información LiDAR. Sin embargo, en un escenario productivo, su cantidad puede producir un rendimiento bajo. Por ello, se ha propuesto un último algoritmo que utiliza prácticamente todos los algoritmos expuestos pero de una forma ordenada y automática. Los resultados obtenidos han sido muy buenos, como se ha constatado mediante pruebas en diversas zonas de ensayo.

Mediante este algoritmo, se han realizado ensayos con archivos con diferente volumen de información utilizando un ordenador con sólo dos núcleos y 32 bits, obteniéndose una media de casi 70 mil puntos clasificados por minuto.

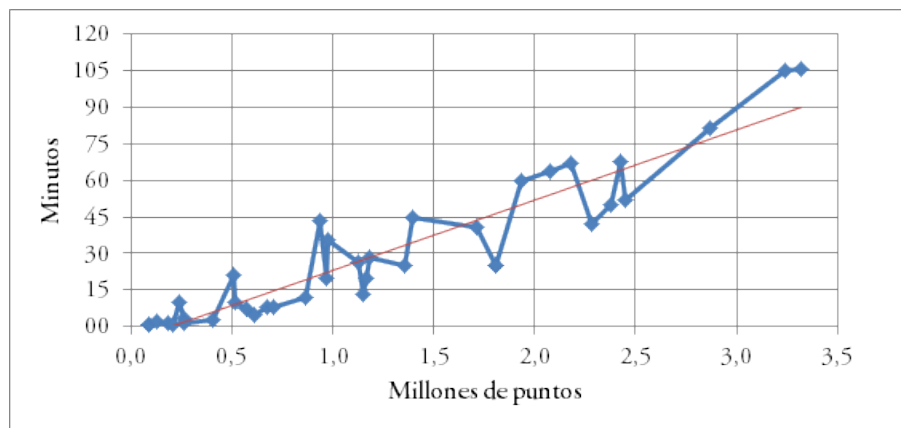


Figura 321: Gráfico con la velocidad de clasificación del algoritmo “Superficie mágica”.

### 8.1.3. Extracción de datos

Además de los algoritmos de modelado y clasificación, se han propuesto otros algoritmos interesantes para la extracción de información como el cálculo de límites de puntos clasificados con el mismo tipo, la integración de información multispectral registrada con otro sensor, útil para poder catalogar con este tipo de información, o el cálculo de mapas derivados como curvas de nivel u ortofotos. Todo ello, para intentar cubrir todo el proceso desde que se obtiene la información LiDAR hasta que se extrae un fichero de cartografía genérica, ya sea vectorial o raster.

El cálculo de líneas límite permite extraer información vectorial de las superficies definidas por puntos pertenecientes a un mismo objeto. Por ejemplo, después del proceso de clasificación se pueden extraer los límites de edificación o vegetación de una zona, generando superficies en formato vectorial.

Para la integración de información multiespectral se han generado algoritmos para utilizar imágenes con o sin georreferenciación, en proyección cónica u ortogonal. De hecho, es posible utilizar imágenes procedentes de cámaras no métricas, basándose en el empleo de la transformación lineal directa (DLT). Esta aplicación es fundamental en el registro terrestre puesto que permitirá posteriormente el cálculo de ortofotos sin necesidad de utilizar cámaras métricas.

Para el cálculo de las curvas de nivel, se propone un algoritmo que no precisa el cálculo de un modelo digital, que es el modo habitual de calcular este tipo de representaciones del relieve. Este algoritmo se basa en la extracción de los límites de nubes de puntos, agrupados en función de su cota.

Por último, también se ha propuesto una metodología para calcular ortofotos verdades (*true-orto*) a partir de información LiDAR, obteniéndose óptimos resultados.

## 8.2. Validación del sistema

Con estos algoritmos propuestos, en el capítulo 7 se han realizado algunos ensayos. Estos ensayos se han dividido en dos grandes grupos: uno, que agruparía ensayos realizados sobre zonas variadas y conocidas e incluso, operando directamente con el sensor; y otro, con ensayos propuestos de manera objetiva por la ISPRS para analizar y comparar la efectividad de los algoritmos de clasificación, tan importantes en el proceso de edición de datos aéreos.

### 8.2.1. Ensayos realizados

Los ensayos incluidos en el primer grupo se han seleccionado buscando la mayor heterogeneidad posible, con el objetivo de probar el comportamiento de los algoritmos y metodologías propuestas. Además, fueron seleccionados por disponer de datos calculados mediante otras técnicas o por haber sido obtenidos directamente mediante el manejo del correspondiente sensor.

La primera zona correspondió a una zona rústica y puso de relieve el buen comportamiento de algunos de los algoritmos desarrollados, por ejemplo, aquellos basados en la intensidad debido a la diferencia entre vegetación y terreno desnudo. Además, se realizaron comprobaciones con datos medidos directamente mediante GNSS y mediante restitución y correlación fotogramétrica, certificando la utilidad del LiDAR aéreo y la bondad de las clasificaciones realizadas.

En altimetría, se proyectaron puntos obtenidos mediante GPS-RTK sobre un modelo digital obtenido a través de información LiDAR. El resultado fue una diferencia media de  $19 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ , tolerable para cartografía a escala 1/1000, que requiere precisiones de 25 cm en la altimetría de los puntos. También se proyectaron puntos obtenidos con fotogrametría clásica sobre los mismos modelos digitales, obteniendo una diferencia media de  $12 \text{ cm} \pm 22$

cm. Se observó que donde se producían más errores era en las líneas de ruptura, debido a que la forma de recogida de datos por el sensor LiDAR es regular no selectiva. Por otro lado, al proyectar los puntos obtenidos con LiDAR sobre modelos digitales del terreno obtenidos a partir de fotogrametría clásica, se obtuvo una diferencia media de  $14 \text{ cm} \pm 21 \text{ cm}$  pero, en este caso, los puntos donde los errores eran mayores estaban en los pequeños cambios de pendiente. Esto es debido a que el LiDAR genera unos modelos digitales más detallados y completos que la fotogrametría clásica.

Además de la comprobación de la eficacia de la metodología propuesta, se procedió a comparar el tiempo empleado por la edición de datos LiDAR y la restitución fotogramétrica. Según esta metodología, se obtuvieron modelos digitales del terreno y superficies a partir de información LiDAR empleando casi un 75% menos de tiempo.

La segunda zona correspondió a una zona urbana donde se pudo comprobar la bondad del funcionamiento en la detección de edificación evitando la vegetación que dificultaba la tarea. Además se pudo comprobar el funcionamiento del algoritmo de extracción de límites de zonas clasificadas como las citadas.

El tercer ensayo se realizó sobre una zona con alta densidad de vegetación, destacando el buen comportamiento de la información LiDAR para el registro del suelo desnudo aventajando a la restitución fotogramétrica. Además, se pudo probar el algoritmo en una zona con mucha vegetación, clasificando los puntos adecuadamente. Se realizó la comprobación del curvado obtenido con el curvado restituído, obteniéndose óptimos resultados.

A continuación, se realizaron dos pruebas de registro de objeto cercano. La primera fue la medición de una fachada arquitectónica. Con esta prueba se pudo utilizar el algoritmo de tetraedrización, la orientación de una imagen sin orientación mediante el algoritmo DLT y la extracción de un modelo para ser utilizado en el cálculo de la ortofoto.

La segunda prueba se realizó en la medición de un petroglifo, pudiendo comparar el proceso con la restitución fotogramétrica. En este caso, la restitución generó mejores resultados que la medición láser realizada, en parte debido, a las necesidades de precisión requeridas no alcanzadas por el sensor láser elegido.

Igualmente, se realizó una prueba con un levantamiento terrestre utilizando un escáner láser en un vehículo en movimiento, en el que figuraban múltiples objetos, pudiendo realizar pruebas con el algoritmo de clasificación por morfología, obteniendo buenos resultados.

Por último, se realizó un levantamiento en el interior de un túnel con el que se realizó un modelado 3D, pudiendo poner a prueba el algoritmo de tetraedrización.

Todos estos ensayos pertenecientes al primer grupo aportaron los datos suficientes para proceder al desarrollo y depuración de los algoritmos propuestos.

### 8.2.2. Evaluación con datos de referencia

El segundo grupo de ensayos comprende zonas del terreno variadas con el objetivo de poner a prueba los test de clasificación LiDAR. Estas zonas fueron propuestas por la ISPRS aportando datos iniciales y soluciones para proceder a la comparación mediante varios indicadores.

Se realizaron las pruebas y permitieron comprobar dónde están las fortalezas y debilidades del algoritmo propuesto. Asimismo, se pudo comparar con otros algoritmos que también tienen publicados sus resultados. Se obtuvieron muy buenos resultados, lo que no es óbice para seguir ampliando la investigación en aras de mejorar en aquellas zonas donde los resultados fueron peores.

En total se realizaron quince ensayos que comprendían casi 400 mil puntos. Para realizar la clasificación se utilizó el algoritmo “Superficie mágica”, el cual no precisa asistencia por parte del usuario, necesitando apenas seis parámetros para su funcionamiento. La media de efectividad de este algoritmo se situó en un 93.4% para el total de puntos. En esta clasificación se detectaron puntos pertenecientes al suelo con una efectividad del 91.8% y puntos pertenecientes a objetos con una efectividad del 96.5%.

Con los datos obtenidos, se procedió a comparar con algoritmos de reconocido prestigio, cuyos datos están publicados en diferentes revistas especializadas de Fotogrametría.

El primer gráfico muestra la comparación de los errores producidos en la identificación de puntos suelo. Como se puede apreciar, el algoritmo propuesto en esta tesis obtiene unos buenos resultados relativos, siendo el que mejor se comporta hasta en cinco ensayos.

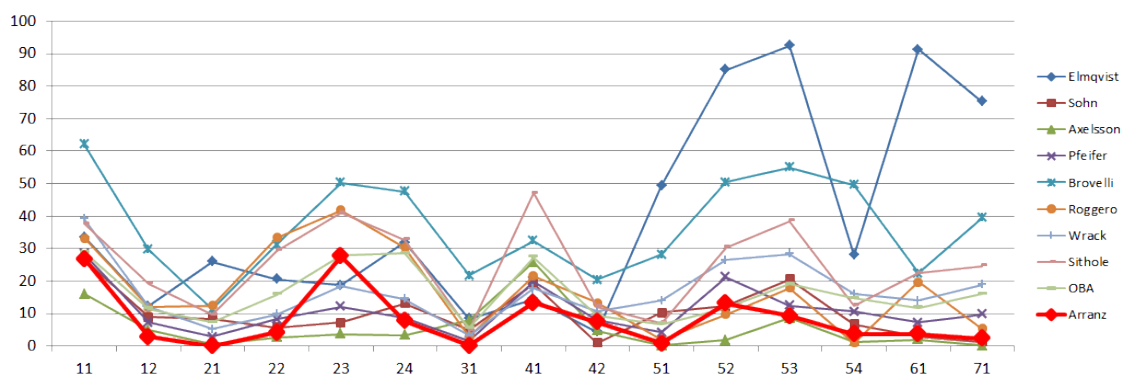


Figura 317: Comparativa entre algoritmos en los errores cometidos al identificar puntos suelo.

El segundo gráfico muestra la comparación de los errores producidos en la identificación de puntos objeto. En este caso, el rango está entre 0% y 19%.



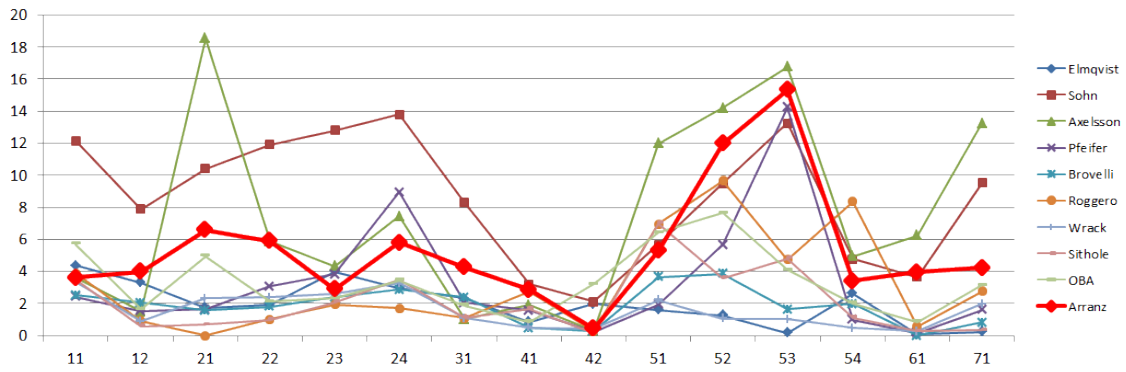


Figura 318: Comparativa entre algoritmos en los errores cometidos al identificar puntos objeto.

El tercer gráfico muestra la comparación de los errores producidos para el conjunto total de puntos. El algoritmo propuesto se mantiene entre aquellos que cometen menos errores.

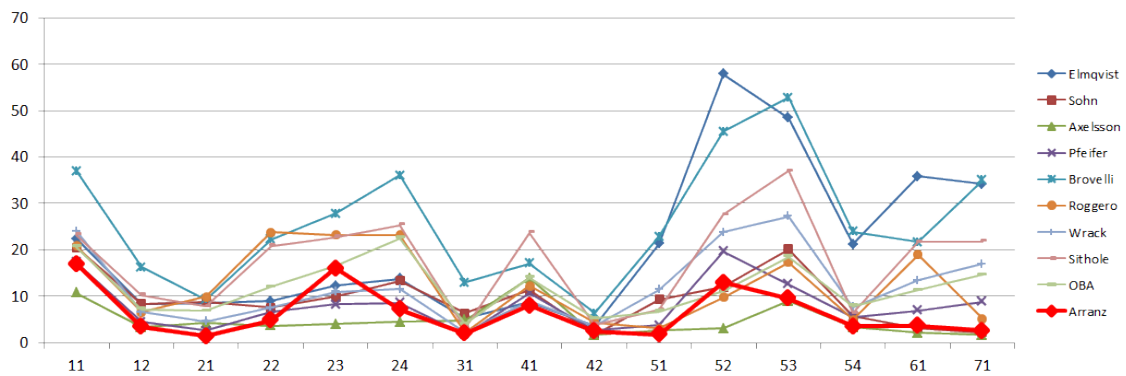


Figura 319: Comparativa entre algoritmos en los errores cometidos al identificar puntos.

Por último, se muestra un gráfico con los valores medios obtenidos en todas las pruebas, ordenado de izquierda a derecha según el menor error cometido en el global de los puntos. Como puede apreciarse, el algoritmo propuesto ocupa una meritoria segunda posición, mostrando unos porcentajes de error equilibrados entre puntos suelo y objeto.

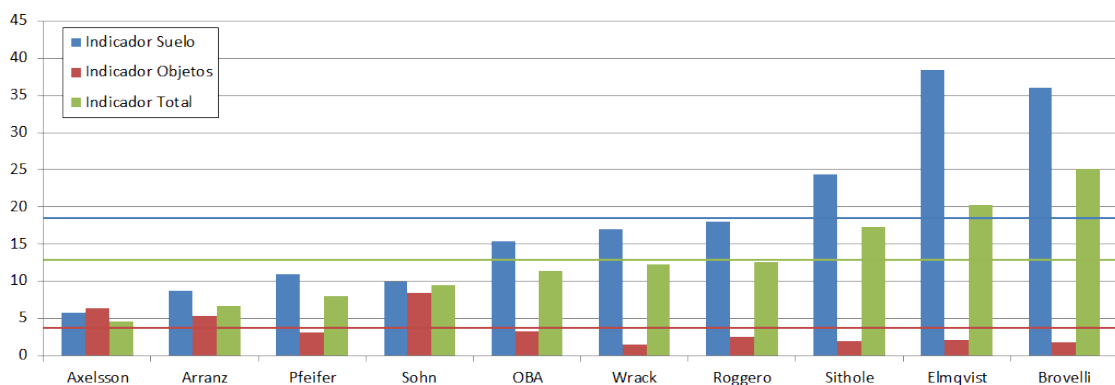


Figura 320: Comparativa entre algoritmos, ordenados de izquierda a derecha, de menor a mayor error total en la clasificación de puntos.

Apoyándose en estas pruebas y en la comparación realizada con otros algoritmos para clasificación de puntos LiDAR, se puede afirmar que, en la presente tesis, se presenta un nuevo algoritmo para clasificación con óptimos resultados. Se ha desarrollado un proceso que pone atención tanto en la clasificación de puntos pertenecientes al suelo desnudo como a objetos sobre la superficie (edificios, vegetación, puentes, líneas eléctricas y otras estructuras). De hecho, los indicadores de eficiencia de ambos son similares, generando un indicador de eficiencia total superior al 93.4%, ocupando una digna segunda posición en la comparación realizada.



Bloque III

# CONCLUSIONES



# Conclusiones

A lo largo del desarrollo de la presente tesis se ha realizado un estudio exhaustivo de las tecnologías láser para la documentación de entidades de interés patrimonial. En él, se han tratado los fundamentos de la medida, funcionamiento, sensores disponibles, algoritmos desarrollados para su tratamiento y aplicaciones comerciales existentes en el mercado. Además, se ha realizado en los tres principales ámbitos de aplicación de los escáneres láser de medición de distancias: aéreo (ALS), terrestre (TLS) y terrestre móvil (MMS).

Este estudio se ha extendido al resto de técnicas de registro geométrico como son la topografía clásica, registro mediante GNSS, fotogrametría y teledetección. Esto ha permitido tener suficientes criterios y parámetros de comparación entre estos sistemas y los sistemas de medición láser.

Como consecuencia del análisis de todas estas técnicas, se vislumbra un futuro marcado por la utilización masiva de dispositivos de registro láser. Esto es debido a su gran rendimiento, facilidad de manejo y amplio abanico de posibilidades de aplicación, que convierten al LiDAR en una opción de peso en prácticamente todos los proyectos de registro geométrico. Además, se prevé su utilización, en un futuro próximo, desde satélites donde ya existen algunos modelos experimentales con óptimos resultados.

Sin embargo, durante el desarrollo de la tesis se ha demostrado que su utilización no debe ser exclusiva, pudiéndose complementar perfectamente con el registro fotogramétrico, ya que éste le aportará la información multispectral que actualmente no tiene (o es muy pobre). Esto es especialmente importante en proyectos de documentación del patrimonio, donde los parámetros radiométricos de caracterización de superficies son imprescindibles.

Por otro lado, se han puesto en evidencia importantes carencias a resolver que pueden provocar una cierta desconfianza en los resultados obtenidos. De hecho, no existe un modelo claro para calcular la precisión que puede alcanzar un sistema de medición láser, debiendo realizar suposiciones sobre modelos teóricos. Tampoco existen metodologías concisas para la calibración de estos sistemas, realizándose actualmente a partir de aplicaciones informáticas que no publican sus métodos.

Tras el análisis realizado de las ventajas e inconvenientes de cada técnica, se concluye que ninguna es completamente infalible para un proyecto completo y, en cada caso, se plantean dificultades y eventualidades en los que convendría combinar algunas de las técnicas vistas. Es decir, la solución idónea en un proyecto multidisciplinar como es la



documentación del patrimonio es la sinergia entre diferentes técnicas de registro geométrico.

Por ello, en un proyecto de documentación geométrica de un asentamiento arqueológico con edificaciones en pie se deberá utilizar fotogrametría para zonas donde sea posible la estereoscopía o donde la correlación sea aceptable (fachadas o murales con policromía); LiDAR basado en pulso para zonas de geometría complicada u oclusiones (monumentos o estatuas); GNSS para el establecimiento de una red de estaciones que actúe de marco de referencia; y una estación total para medir puntos de apoyo para los pares estereoscópicos o para transferir coordenadas a zonas bajo techo (cuevas o pasadizos) o interiores de edificios. Los detalles ornamentales deberán ser registrados utilizando LiDAR basado en triangulación, aportando precisión submilimétrica.

En la investigación, se ha realizado un estudio de los algoritmos de tratamiento de la información LiDAR, detectando una falta de alternativas informáticas para el tratamiento de este tipo de información. De hecho, existen menos de diez aplicaciones que traten esta información de manera efectiva. Debido a la heterogeneidad de los proyectos, las metodologías de actuación tampoco son únicas, por lo que los resultados pueden ser muy dispares en función de la aplicación elegida. Esto es un inconveniente en la realización de grandes proyectos de documentación en los que participen varios equipos de trabajo, puesto que los resultados obtenidos pueden ser diferentes abocando sobre un producto no homogéneo en precisión y detalle.

Por tanto, con toda la información recopilada, se ha desarrollado e implementado un sistema novedoso que mejora la metodología de tratamiento de los datos geométricos procedentes de sensores LiDAR. Además, esta metodología ha contemplado parámetros de interés en diversos ámbitos de documentación de entidades de interés patrimonial. Se ha ofrecido un flujo de trabajo que gestiona la información desde su obtención a partir del sensor hasta convertirse en un producto cartográfico (vectorial o raster).

Para llevar a cabo este cometido, se han desarrollado y probado hasta 19 algoritmos diferentes analizando sus debilidades y fortalezas. De hecho, se han propuesto nuevas alternativas para el modelado, tanto en 2.5D (utilizando triangulaciones) como en 3D (utilizando tetraedrizaciones), obteniendo modelos digitales con gran velocidad. Los algoritmos propuestos han sido:

- Triangulación rápida en 2D.
- Tetraedrización espacial.
- Clasificación en función de la geometría.
- Clasificación en función del orden de registro.
- Clasificación en función de la radiometría, que a su vez incluye un algoritmo que contemplaba la intensidad y otro que utilizaba la información multispectral.

- Clasificación en función de la geometría y la radiometría, que también incluye dos algoritmos para intensidad y color.
- Detección de puntos erróneos, que incluye tres algoritmos diferentes para detectar puntos elevados, hundidos y aislados.
- Detección automática de puntos sobre fachadas y cubiertas de edificios.
- Clasificación en función de la morfología, pudiendo extraer a su vez el mapa de curvas de nivel.
- Clasificación automática, denominado “Superficie mágica”.
- Extracción de límites vectoriales de conjuntos de puntos clasificados.
- Integración de información multispectral a la nube de puntos, que incluye tres algoritmos diferentes en función de la información disponible de la imagen.
- Cálculo de la ortofoto a partir de datos LiDAR.

Para evaluar la efectividad de estos algoritmos y demostrar el funcionamiento y aplicación de la tecnología LiDAR, se han realizado varios ensayos con diferentes tipos de datos, donde se han puesto de relieve las ventajas y desventajas tanto de la técnica como de las herramientas. Estos ensayos han sido elegidos teniendo en cuenta el amplio abanico de posibilidades de proyectos de documentación de entidades de interés patrimonial, por lo que se han elegido proyectos en zonas rústicas, urbanas, de vegetación arbórea densa, arquitectónicos, arqueológicos o en cuevas. Los resultados han sido satisfactorios, respondiendo a lo esperado según los requerimientos, instrumentación y sistema empleado. A partir de ellos, se han extraído importantes conclusiones sobre el funcionamiento de los sensores LiDAR y su comparación con otras técnicas geomáticas de registro.

Por último, se ha realizado la evaluación del algoritmo automático de clasificación de información LiDAR propuesto en esta tesis, a partir de ensayos propuestos por la Asociación Internacional de Fotogrametría y Teledetección (ISPRS). Esta evaluación ha permitido, adicionalmente, su comparación con otros algoritmos existentes en el mercado, obteniendo resultados satisfactorios. Basándose en éstos, se concluye que el algoritmo clasifica con un índice de efectividad superior al 93%, obteniendo indicadores homogéneos tanto en la clasificación de puntos pertenecientes al suelo desnudo como a otro tipo de objetos.



# Futuras líneas de investigación

Cómo se ha visto durante el desarrollo de la tesis, los ámbitos de aplicación del LiDAR son muy variados y la técnica es relativamente joven, por lo que existen muchos caminos para proseguir investigando, desarrollando y mejorando las propuestas existentes. No obstante, a continuación se enumeran aquellos que podrían ser más interesantes.

El reconocimiento de formas de objetos, sobre todo edificaciones y árboles, utilizando LiDAR aerotransportado no está completamente desarrollado todavía. Se requieren algoritmos que permitan calcular de manera precisa el límite de una edificación y su morfología. Aunque en este documento se ha propuesto un algoritmo, se trataría de mejorarlo mediante el ajuste de las líneas por MM.CC. Igualmente puede ocurrir con las especies arbóreas, donde sería importante la utilización de datos multiespectrales, sobre todo información en el rango del infrarrojo. Con esta información, se pueden calcular representaciones tridimensionales aproximadas más reales de las edificaciones y vegetación de una zona.

En el ámbito del registro de objetos cercanos, sería interesante proponer algoritmos de reconstrucción de objetos utilizando primitivas matemáticas como cilindros, conos, prismas, etc., que se ajusten a un conjunto de datos LiDAR. Esto mejoraría el modelado de múltiples objetos en el registro de naves industriales, arquitectura o arqueología.

Aunque en la presente tesis se ha trabajado en este tipo de algoritmos, otra línea de investigación posible sería la mejora en la extracción de líneas de ruptura 3D, mediante la selección de puntos cuya desviación típica con el entorno sea superior a un determinado umbral. Estos algoritmos se podrían utilizar tanto para datos aéreos como terrestres.

Como se ha visto en el modelado 3D utilizando tetraedrizaciones, existen zonas donde el láser no ha podido registrar con una adecuada densidad, produciéndose huecos no deseados. Por tanto, otro proyecto sería el desarrollo de un algoritmo para cubrirlos, utilizando por ejemplo, la técnica del camino descrito por una gota de agua.

Uno de los últimos avances en el registro mediante LiDAR de pulso es el registro de infinitos ecos de respuesta, conocido como “*full-waveform*”. Por ello, un futuro trabajo de investigación es el tratamiento de este tipo de información y su aplicación más inmediata

para el modelado de especies forestales. Sin embargo, también se pueden investigar las posibilidades de este tipo de registro en la medición de otros objetos.

Otro algoritmo interesante para la mejora de modelos tridimensionales es el cálculo de las superficies NURBS ajustadas a los puntos por MM.CC.

En este sentido, también se podría mejorar la representación la utilización de texturas en todas las caras del modelo 3D.

Por último y aunque se ha propuesto un algoritmo de clasificación con buenos resultados, se seguirá investigando para ampliar el desarrollo en el algoritmo de clasificación mediante morfología propuesto, ya que se podrían detectar fácilmente más objetos sobre todo en zonas urbanas.

Bloque IV

# BIBLIOGRAFÍA





# Bibliografía

3D Laser Mapping, 2013. *Geospatial Business Intelligence*. [www.3dlasermapping.com](http://www.3dlasermapping.com). Último acceso: Febrero 2013.

Acute3D, 2013. *Acute3D*. [www.acute3d.com](http://www.acute3d.com). Último acceso: Febrero 2013.

Agisoft, 2013. *Image-based 3D modeling*. [www.agisoft.ru](http://www.agisoft.ru). Último acceso: Febrero 2013.

AHAB, 2013. *Airborne Hydrography AB*. [www.airbornehydro.com](http://www.airbornehydro.com). Último acceso: Febrero 2013.

Applied Imagery, 2013. *LiDAR exploitation software*. [www.appliedimagery.com](http://www.appliedimagery.com). Último acceso: Febrero 2013.

Arefi, H. & Hahn, M., 2005. *A morphological reconstruction algorithm for separating off-terrain points from terrain points in laser scanning data*. Enschede (Holanda), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.

Arranz, J. J., 2008. *Nuevo método de suavizado de modelos digitales del terreno procedentes de correlación fotogramétrica automática mediante interpolación bicúbica*. Valencia (España), Congreso Internacional de Ingeniería Geomática y Topografía.

Arranz, J. J., Novoa, A. & Sánchez, D., 2012. *Nuevo algoritmo de generalización lineal y ortogonalización de construcciones en un entorno urbano*. Madrid (España), Colegio Oficial de Ingeniero Técnicos en Topografía de España.

Arranz, J. J., Ormeño, S. & Vicent, J. M., 2012. *Algoritmo para la clasificación de nubes de puntos LiDAR en entornos urbanos: discriminación entre vegetación y edificaciones*. Madrid (España), Colegio Oficial de Ingeniero Técnicos en Topografía de España.

Arranz, J. J. & Vígara, A. B., 2012. *Propuesta de metodología de trabajo para la obtención de cartografía a partir de datos LiDAR registrados en una zona rústica*. Madrid (España), Colegio Oficial de Ingeniero Técnicos en Topografía de España.

ASPRS, 2004. *Manual of photogrammetry*. Quinta ed. EE.UU.: ASPRS.

ASPRS, 2010. *LAS Specification. Version 1.3 - R11*, EE.UU.: ASPRS.

Axelsson, P., 2001. *Ground estimation of laser data using adaptive TIN-models*. Estocolmo (Suecia), OEEPE workshop on airborne laserscanning and inteferometric SAR for detailed digital elevetion models.

Baatz, M. & Schäpe, A., 2000. Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(3-4), pp. 12-23.

Baltsavias, E. P., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Issue 54, pp. 83-94.

Baltsavias, E. P., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Issue 54, pp. 199-214.

Baltsavias, E. P., 1999. Airborne laser scanning: Existing systems, firms, and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Issue 54, pp. 164-198.

Baltsavias, E. P. y otros, 2006. *Extraction of Geospatial Information from High Spatial Resolution Optical Satellite Sensors*. Goa (India), ISPRS Technical Commission IV Symposium "Geospatial Databases for Sustainable Development".

Barbour, N. M., 2011. *Inertial Navigation Sensors*, Cambridge (EE.UU.): OTAN.

Barbour, N. & Schmidt, G., 1998. *Intertial Sensor Technology Trends*. EE.UU., IEEE.

Besl, P. J., 1988. Active, Optical Range Imaging Sensors. *Machine Vision and Applications*, Issue 1, pp. 127-152.

Binet, R., 2009. *Potential of Very High Resolution Optical Images for geometric change detection*. Pasadena (EE.UU.), KISS Workshop (Caltech).

Bornaz, L. & Rinaudo, F., 2004. *Terrestrial laser scanner data processing*. Estambul (Turquía), International Congress of ISPRS.

Bretara, F., Chauvea, A., Malleta, C. & Jutzib, B., 2008. Managing full waveform LiDAR data: A challenging task for the forthcoming years. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(B1), pp. 415-420.

Breuckmann, 2013. *Topometrische 3d Scanner*. [www.breuckmann.com](http://www.breuckmann.com). Último acceso: Febrero 2013.

Briese, C., Mandlbürger, G. & Pfeifer, N., 2007. *Airborne laser scanning - High quality Digital Terrain Modelling*. Nowosibirsk (Rusia), Geosiberia, III International Scientific Congress, pp. 79-92.

Briese, C., Pfeifer, N. & Haring, A., 2003. Laserscanning and Photogrammetry for the Modelling of the Statue Marc Anton. En: O. Altan, ed. *New Perspectives to Save the Cultural Heritage*. Antalya (Turquía): International Archives for Documentation of

Cultural Heritage of the CIPA and International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences of the ISPRS, pp. 528-533.

Briese, C. et al., 2012. *Radiometric calibration of multi-wavelength airborne laser scanning data*. Melbourne (Australia), XXII ISPRS Congress.

Brovelli, M., Cannata, M. & Longoni, U., 2002. *Managing and processing LiDAR data within GRASS*. Trento (Italia), Proceedings of the GRASS Users Conference.

Bryan, P., Blake, B. & Bedford, J., 2009. *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*. Segunda ed. Reino Unido: English Heritage.

Cabrejas, E., Mañana-Borrazás, P. & Seoane-Veiga, Y., 2009. Achado dunhas lousas con arte megalítico en Fonte Tourón (Lalín, Pontevedra). *Cuadernos de Estudios Gallegos*, Issue 122, pp. 9-31.

Cano, P., Lamolda, F., Torres, J. C. & Villafranca, M. d. M., 2010. Uso de escaner láser 3D para registro del estado previo a la intervención de la Fuente de los Leones de La Alhambra. *Virtual Archaeology Review*, Volumen 1(2), pp. 89-94.

Cavendish, J., Field, D. & Frey, W., 1985. An approach to automatic three-dimensional finite element mesh generation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 21(2), pp. 329-347.

Chueca Pazos, M., Herráez Borquera, J. & Berné Valero, J. L., 1996. *Métodos topográficos*. Primera ed. Madrid (España): Paraninfo.

Comunidad de Madrid, 2013. *Estaciones Base GPS y Fondo Cartográfico*. [www.madrid.org/cartografia/planea/cartografia/html/web/VisorGps.htm](http://www.madrid.org/cartografia/planea/cartografia/html/web/VisorGps.htm). Último acceso: Enero 2013.

Cozzi, P. & Ring, K., 2011. *3D Engine Design for Virtual Globes*. Primera ed. EE.UU.: CRC Press.

CSIC, 2005. *Realización de diversos trabajos de investigación arqueológica en el ámbito del Parque Arqueológico del arte rupestre de Campo Lameiro (provincia de Pontevedra) y del futuro Parque Arqueológico del megalitismo (provincia de A Coruña)*, Madrid: Consellería de Cultura, Comunicación Social y Turismo de la Xunta de Galicia y Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Dana, I., Poncos, V. & Teleaga, D., 2009. *Comparative analysis of InSAR digital surface models for test area Bucharest*. Frascati (Italia), Fringe 2009 Workshop.

Digi21, 2013. *Software de SIG, Fotogrametría, Topografía y Cartografía*. [www.digi21.net](http://www.digi21.net). Último acceso: Febrero 2013.

Doneus, M. & Briese, C., 2006. *Full-waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance*. Roma (Italia), BAR International Series, pp. 99-105.

Doneus, M., Briese, C. & Studnicka, N., 2010. Analysis of full-waveform ALS data by simultaneously acquired TLS data: towards an advanced DTM generation in wooded areas. En: W. Wagner & B. Székely, edits. *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS*. Viena (Austria): IAPRS, pp. 193-198.

Eisenbeiß, H., 2009. *UAV Photogrammetry*, Zurich (Suiza): Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zurich.

Ekhtari, N., Sahebi, M., Valadan Zoej, M. & Mohammadzadeh, A., 2008. Automatic building detection from LiDAR point cloud data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(Part B4), pp. 473-477.

Elmqvist, M., 2001. *Ground estimation of Lasar Radar data using Active Shape Models*. Estocolmo (Suecia), OEEPE workshop on airborne laserscanning and inteferometric SAR for detailed digital elevation models.

English Heritage, 2007. *3D Laser Scanning for Heritage*. Reino Unido: English Heritage.

English Heritage, 2009. *Measured and Drawn. Techniques and practice for the metric survey of historic buildings*. Segunda ed. Reino Unido: English Heritage.

English Heritage, 2013. *English Heritage*. [www.english-heritage.org.uk](http://www.english-heritage.org.uk). Último acceso: Febrero 2013.

eoPortal, 2013. *Sharing Earth Observation Resources*. [www.eoportal.org](http://www.eoportal.org). Último acceso: Febrero 2013.

Eos Systems, 2013. *Imaging and measurement technology*. [www.eosystems.com](http://www.eosystems.com). Último acceso: Febrero 2013.

Everaerts, J., 2008. *The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for Remote Sensing and Mapping*. Beijing (China), The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Fairchild, M. D., 2004. *Color Appearance Models: CIECAM02 and Beyond*. Scottsdale (EE.UU.), IS&T/SID 12th Color Imaging Conference.

FARO, 2013. *Productos y soluciones de MMC portátiles de FARO*. [europe.faro.com](http://europe.faro.com). Último acceso: Febrero 2013.

Fernandez, J., Singhanian, A., Caceres, J. & Sla, K., 2007. *An Overview of Lidar Point Cloud Processing Software*, EE.UU.: Geosensing Engineering and Mapping (GEM). Civil and Coastal Engineering Department. University of Florida.

Filin, S., 2005. Elimination of systematic errors from airborne laser scanning data. *IEEE*, pp. 517-520.

Fugro, 2013. *Fugro World Wide*. [www.fugro.com](http://www.fugro.com). Último acceso: Febrero 2013.

Gianinetto, M., 2005. *Automatic topographic features extraction from Pléiades HR and Orbview-5 simulated data*. Beijing (China), The International Archive of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Grussenmeyer, P., Hanke, K. & Streilen, A., 2002. Architectural photogrammetry. En: M. Kasser & Y. Egels, edits. *Digital Photogrammetry*. Corfu (Grecia): Taylor & Francis, pp. 300-339.

Guenther, G. C., Cunningham, A. G., LaRocque, P. E. & Reid, D. J., 2000. *Meeting the accuracy challenge in airborne LiDAR bathymetry*. Dresden (Alemania), EARSeL-SIG-Workshop LIDAR.

Habib, A. F., 2009. *Integration of Photogrammetric and LiDAR Data for Accurate Reconstruction & Realistic Visualization of Urban Environments*. Calgary (Canadá), Universidad de Calgary.

Hanssen, R. F., 2002. *Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis*. Delft (Holanda): Kluwer Academic Publishers.

Hermosilla, T., 2011. *Detección automática de edificios y clasificación de usos del suelo en entornos urbanos con imágenes de alta resolución y datos LiDAR*, Valencia (España): Universidad Politécnica de Valencia.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J., 2001. *GPS Theory and Practice*. Quinta ed. EE.UU.: Springer-Verlag.

Honeywell, 2013. *Honeywell Aerospace*. [www.honeywell.com/sites/aero](http://www.honeywell.com/sites/aero). Último acceso: Febrero 2013.

Hug, C. & Wehr, A., 1997. *Detecting and identifying topographic objects in image laser altimeter data*. Stuttgart (Alemania), IAPRS.

Hur, S.-M., Kim, H.-C. & Lee, S.-H., 2002. STL File Generation with Data Reduction by the Delaunay Triangulation Method in Reverse Engineering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Issue 19, pp. 669-678.

Ibáñez, E., 2008. *Validación de modelos digitales del terreno de precisión a partir de datos láser escáner aerotransportado; aplicación a la marisma del Parque Nacional de Doñana*, Barcelona (España): Universidad Politécnica de Cataluña.

IGI, 2013. *Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH*. [www.igi.eu](http://www.igi.eu). Último acceso: Febrero 2013.



- Innovmetric, 2013. *3D Scanner software*. [www.innovmetric.com](http://www.innovmetric.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Inpho, 2013. *Inpho, Leader in photogrammetry and digital surface modeling*. [www.inpho.de](http://www.inpho.de). Último acceso: Febrero 2013.
- InSAR Working Group, 2004. *InSAR Workshop Summary Report*, Oxnard (EE.UU.): NASA.
- Instituto Geográfico Nacional, 2009. *El nuevo modelo de geoide para España EGM08-REDNAP*, Madrid (España): Centro de Observaciones Geodésicas, Subdirección General de Astronomía, Geodesia y Geofísica.
- Isenburg, M., 2013. *LASzip - Lossless LAS compression*. [www.laszip.org](http://www.laszip.org).
- Isenburg, M., Liu, Y., Shewchuk, J. & Snoeyink, J., 2006. Streaming Computation of Delaunay Triangulations. *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006*, Volumen 25(3), pp. 1049-1056.
- ISPRS, 2007. *Proceedings of the ISPRS Workshop "Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007"*. Espoo (Finlandia), ISPRS.
- IXBLUE, 2013. *IXBLUE*. [www.ixsea.com](http://www.ixsea.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Jacobsen, K., 2003. *Geometric Potential of IKONOS -and QuickBird- Images*, Hannover (Alemania): Universidad de Hannover.
- Jacobsen, K., 2006. High Resolution Imaging Satellite Systems. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, Issue 6, p. 487–496.
- Jáuregui, M., Jáuregui, L., Chacón, L. & Vélchez, J., 2009. Documentación de sitios arqueológicos usando estereo-imágenes de formato pequeño (cámaras no métricas). *Revista Geográfica Venezolana*, 50(2), pp. 235-246.
- Jenoptik, 2013. *Jenoptik AG*. [www.jenoptik.com](http://www.jenoptik.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Jiang, J. & Ming, Y., 2006. *Classification and filtering of LiDAR point clouds for dtm generation*. Enschede (Holanda), ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes".
- Johnson, P., 2006. *Unmanned aerial vehicle as the platform for lightweight laser sensing to produce sub-meter accuracy terrain maps for less than \$5/km<sup>2</sup>*, Nueva York (EE.UU.): Columbia University.
- Juan, C. d., 2009. La prospección arqueológica subacuática. Principios y métodos. En: *Arqueologia Nàutica Mediterrània*. Girona (España): Museu d'Arqueologia de Catalunya-CASC, pp. 121-132.

- Kim, A. M., 2009. *Simulating full-waveform LiDAR*, Monterey (EE.UU.): Naval Postgraduate School.
- Konica Minolta, 2013. *Measuring instruments Konica Minolta Europe*. [www.konicaminolta.eu/en/measuring-instruments/home.html](http://www.konicaminolta.eu/en/measuring-instruments/home.html). Último acceso: Febrero 2013.
- Kraus, K., 1997. *Photogrammetry. Advanced Methods and Applications*. Cuarta edición ed. Bonn (Alemania): Dümmler Verlag.
- Kraus, K., 2007. *Photogrammetry. Geometry from images and laser scans*. Segunda ed. Berlin (Alemania): Walter de Gruyter.
- kubit, 2013. *Software for surveying and as-built documentation*. [www.kubit-software.com](http://www.kubit-software.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Kugler, F., Toraño Caycoya, A., Hajnsek, I. & Papathanassiou, K., 2011. *Forest Characterisation by Means of TerraSAR-X and TanDEM-X Polarimetric Interferometric Data*. Frascati (Italia), PolInSAR 2011 Workshop.
- Laser scanning, 2013. *Laser scanning Europe*. [www.laserscanning-europe.com/en](http://www.laserscanning-europe.com/en). Último acceso: Febrero 2013.
- Lee, J.-S. & Pottier, E., 2009. *Polarimetric Radar Imaging from basics to applications*. Primera ed. EE.UU.: CRC Press.
- Leica, 2013. *Leica Geosystems*. [www.leica-geosystems.es](http://www.leica-geosystems.es). Último acceso: Febrero 2013.
- Lerma, J. L. & Biosca, J. M., 2008. *3DRiskMapping. Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre*. Versión 5 ed. s.l.:Agencia Flamenca del programa europeo Leonardo Da Vinci.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Harley, I., 2006. *Close range photogrammetry*. s.l.:Whittles Publishing.
- Maas, H.-G., 1999. *The potential of height texture measures for the segmentation of airborne laserscanner data*. Ottawa (Canadá), IV International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition / XXI Canadian Symposium on Remote Sensing.
- Mallet, C. & Bretar, F., 2009. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Issue 64, pp. 1-16.
- Mantis Vision, 2013. *Mantis Vision*. [www.mantis-vision.com](http://www.mantis-vision.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Mañana-Borrazás, P., Blanco-Rotea, R. & Rodríguez, A., 2009. La documentación geométrica de elementos patrimoniales con láser escáner terrestre. La experiencia del LaPa en Galicia. *Cuadernos de estudios gallegos*, LVI(122), pp. 33-65.

- McCandless, S. W. & Jackson, C. R., 2013. *Principles of Synthetic Aperture Radar*. [www.sarusersmanual.com](http://www.sarusersmanual.com).
- MDL, 2013. *The Portable Mobile Mapping & GIS Data Collection Solution*. [www.mdl-laser.com](http://www.mdl-laser.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Meng, X., Currit, N. & Zhao, K., 2010. Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. *Remote Sensing*, Volumen 2, pp. 833-860.
- Meng, X., Wang, L., Silván-Cárdenas, J. L. & Currit, N., 2009. A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Issue 64, pp. 117-124.
- Merrick, 2013. *Merrick & company*. [www.merrick.com](http://www.merrick.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Mesa Imaging, 2013. *Mesa Imaging AG - SwissRanger SR4000 - miniature 3D time-of-flight range camera. 3D Camera*. [www.mesa-imaging.ch](http://www.mesa-imaging.ch). Último acceso: Febrero 2013.
- Microsoft, 2013. *Kinect for Windows | Voice, Movement & Gesture Recognition Technology*. [www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows](http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows). Último acceso: Febrero 2013.
- Ministerio de Cultura, 2010. *Documentación gráfica del Patrimonio*. Madrid (España): Ministerio de Cultura.
- Mitsubishi Electric, 2013. *Mobile Mapping System*. [www.mitsubishielectric.com/products/space/mms/index.html](http://www.mitsubishielectric.com/products/space/mms/index.html). Último acceso: Febrero 2013.
- Molina, Í., 2010. *Modelización del coeficiente de retrodifusión radar integrando variables biofísicas para la caracterización de las cubiertas vegetales*, Madrid (España): Universidad Politécnica de Madrid.
- Moreno, G., 2007. *Extracción de edificios y de vegetación a partir de nubes de puntos LiDAR*, Jaén (España): Universidad de Jaén.
- Morgan, M. & Habib, A., 2001. *3D TIN for automatic building extraction from airborne laser scanning data*. San Luis (EE.UU.), Proceedings of the ASPRS "Gateway to the New Millennium".
- Moysiadis, A. & Perakis, K., 2011. *The potential of conventional surveying, photogrammetry and laser scanning in monuments of cultural heritage documentation*. Skiathos (Grecia), Proceedings of the 3rd International CEMEPE & SECOTOX Conference.
- Nardinocchi, C., Forlani, G. & Zingaretti, P., 2003. *Classification and filtering of laser data*. Dresden (Alemania), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- NextEngine, 2013. *NextEngine 3D Laser Scanner*. [www.nextengine.com](http://www.nextengine.com). Último acceso: Febrero 2013.

NGA, 2013. *National Geospatial-Intelligence Agency*. [www.nga.mil](http://www.nga.mil).

NUB3D, 2013. *nub3d*. [www.nub3d.com](http://www.nub3d.com). Último acceso: Febrero 2013.

Oggier, T. y otros, 2005. *SwissRanger SR3000 and First Experiences based on Miniaturized 3D-TOF Cameras*. Zurich (Suiza), ETH 1st range imaging research days.

Optech, 2013. *Manufacturer of World-class LiDAR solutions*. [www.optech.ca](http://www.optech.ca). Último acceso: Febrero 2013.

Panasonic, 2013. *3D Image Sensor*. [www2.panasonic.biz/es/densetsu/device/3DImageSensor](http://www2.panasonic.biz/es/densetsu/device/3DImageSensor). Último acceso: Febrero 2013.

Parcero, C., Méndez, F. & Blanco, R., 1999. *El registro de la información en intervenciones arqueológicas*. Primera ed. Santiago de Compostela (España): Laboratorio de Arqueología e Formas Culturais (GIARPa), IIT, Universidad de Santiago de Compostela.

Petrie, G., 2010. An introduction to the technology Mobile Mapping Systems. *GEOInformatics*, Enero.pp. 32-43.

Petrie, G., 2011. Current developments in the technology airborne topographic laser scanners. *GEOInformatics*, Febrero.pp. 34-43.

Pfeifer, N. & Briese, C., 2007. *Laser scanning - Principles and applications*. Nowosibirsk (Rusia), Geosiberia, III International Scientific Congress.

Pfeifer, N. & Stadler, P., 2001. *Derivation of digital terrain models in the SCOP environment*. Estocolmo (Suecia), OEEPE workshop on airborne laserscanning and interferometric SAR for detailed digital elevation models.

Pfennigbauer, M. & Ullrich, A., 2011. *Multi-Wavelength Airborne Laser Scanning*. Nueva Orleans (EE.UU.), ILMF.

Photometrix, 2013. *Software systems for Image-based 3D measurement*. [www.photometrix.com.au](http://www.photometrix.com.au). Último acceso: Febrero 2013.

Pix4D, 2013. *Next-Generation Aerial Image Processing Software*. [www.pix4d.com](http://www.pix4d.com). Último acceso: Febrero 2013.

PMD, 2013. *pmd[vision]® CamCube 3.0*. [www.pmdtec.com/news\\_media/video/camcube.php](http://www.pmdtec.com/news_media/video/camcube.php). Último acceso: Febrero 2013.

Puente, I., González-Jorge, H., Arias, P. & Armesto, J., 2009. *Land-based mobile laser scanning systems: A review*. Paris (Francia), The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

QPS, 2013. *Hydrographic and marine software solutions*. [www.qps.nl](http://www.qps.nl). Último acceso: Febrero 2013.

Quadros, N. D., Collier, P. & Fraser, C., 2008. *Integration of bathymetric and topographic lidar: A preliminary investigation*. Beijing (China), The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

RACURS, 2013. *Software solutions in the field of photogrammetry, GIS and remote sensing*. www.racurs.ru. Último acceso: Febrero 2013.

Remondino, F., 2011. Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. *Remote Sensing*, Volumen 3, pp. 1104-1138.

Remondino, F. et al., 2011. *UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling - Current Status and future perspectives*. Zurich (Suiza), International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Rey, J. M., Infante, F., Rodríguez, E. & Tallón, M. J., 2004. *O Parque Arqueológico de Arte Rupestre*. Santiago de Compostela (España): Dirección Xeral de Patrimonio Cultural (Xunta de Galicia).

Riegl, 2013. *Riegl Laser measurement systems*. www.riegl.com. Último acceso: Febrero 2013.

Roggero, M., 2002. *Object segmentation with region growing and principal component analysis*. Graz (Austria), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 289-294.

Rönnholm, P., Hyypä, H., Hyypä, J. & Haggrén, H., 2009. Orientation of Airborne Laser Scanning Point Clouds with Multi-View, Multi-Scale Image Blocks. *Sensors*, Issue 9, pp. 6008-6027.

Roth, R. & Thompson, J., 2008. *Practical application of Multiple Pulse In Air (MPIA) LiDAR in large-area surveys*. Beijing (China), The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.

Rubio, D. y otros, 2009. *Nuevos métodos para viejas tecnologías: análisis y documentación de los materiales arqueológicos mediante la aplicación de sistemas Láser-scanner 3D*. Sevilla (España), I Congreso Internacional de Arqueología e Informática Gráfica, Patrimonio e Innovación.

Sester, M. & Neidhart, H., 2008. *Reconstruction of Building Ground Plans from Laser Scanner Data*. Girona (España), 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science.

Shin, J.-I., Yoon, J.-S., Lee, K.-S. & Kim, T.-k., 2012. *Characteristics of Intensity Signal from Airborne LiDAR Data*. Bali (Indonesia), Asian Conference on Remote Sensing (ACRS).

Shreiner, D., Woo, M., Neider, J. & Davis, T., 2006. *OpenGL Programming Guide*. Quinta ed. EE.UU.: Addison-Wesley.

SICK, 2013. *Sensor intelligence*. www.sick.com. Último acceso: Febrero 2013.

- Siteco, 2013. *Siteco informatica*. [www.sitecoinf.it](http://www.sitecoinf.it). Último acceso: Febrero 2013.
- Sithole, G., 2001. *Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter*. Annapolis (EE.UU.), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 203-210.
- Sithole, G. & Vosselman, G., 2003. *ISPRS Comparison of Filters*, Delft (Holanda): ITC.
- Sithole, G. & Vosselman, G., 2005. *Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds*. Enschede (Holanda), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Sohn, G. & Dowman, I., 2002. *Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion*. Graz (Austria), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 336-344.
- Song, J.-H., Han, S.-H., Yu, K. & Kim, Y.-I., 2002. Assessing the possibility of land-cover classification using LiDAR intensity data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volumen 34 (3/B), pp. 259-262.
- Sotoodeh, S., 2007. *Hierarchical clustered outlier detection in laser scanner point clouds*. Espoo (Finlandia), ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007.
- Strecha, C., 2012. *UAV Based Mapping and 3D Modelling*. Hannover (Alemania), InterGEO.
- Technodigit, 2013. *The 3D scanner software: point cloud processing, 3D modeling, reverse engineering, surface reconstruction, texture mapping*. [www.3dreshaper.com](http://www.3dreshaper.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Terrasolid, 2013. *Software for LiDAR Processing*. [www.terrasolid.com](http://www.terrasolid.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Topcon, 2013. *Topcon Positioning Europe*. [www.topcon-positioning.eu](http://www.topcon-positioning.eu). Último acceso: Febrero 2013.
- Toth, C., 2010. *Airborne Lidar Technology: The state-of-the-art and future trends*. Chile, Latin American Remote Sensing Week Regional ISPRS Conference.
- Trimble, 2013. *GPS, Laser, Optics and Positioning Hardware, Software and Services*. [www.trimble.com](http://www.trimble.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Trimble, 2013. *Land mobile*. [www.trimble-drive.com](http://www.trimble-drive.com). Último acceso: Febrero 2013.
- UNESCO, 1972. *Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural*. París (Francia), UNESCO.
- unmanned.co.uk, 2013. *Unmanned ground, aerial, sea and space systems*. [www.unmanned.co.uk](http://www.unmanned.co.uk). Último acceso: Febrero 2013.



- UVS International, 2013. *UVS International, federating the global UVS community*. [www.uvs-international.org](http://www.uvs-international.org). Último acceso: Febrero 2013.
- Valle Melón, J. M., 2006. Reflexiones sobre la Documentación Geométrica del Patrimonio. *Papeles del Patal*, Issue 3, pp. 97-123.
- van Ess, M. & Fassbinder, J., 2005. Magnetic prospection of Uruk (Warka) Iraq. *La Prospection Géophysique*, Noviembre, Issue 308, pp. 20-25.
- Velodyne Lidar, 2013. *High Definition Lidar*. [www.velodynelidar.com](http://www.velodynelidar.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Vexcel, 2013. *Vexcel, a Microsoft Company*. [www.vexcel.com](http://www.vexcel.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Vosselman, G. & Maas, H., 2001. *Adjustment and filtering of raw laser altimetry data*. Estocolmo (Suecia), OEEPE workshop on airborne laserscanning and inteferometric SAR for detailed digital elevation models.
- Wackrow, R. & Chandler, J. H., 2011. Minimising systematic error surfaces in digital elevation models using oblique convergent imagery. *The Photogrammetric Record*, 26(133), pp. 16-31.
- Wack, R. & Wimmer, A., 2002. *Digital Terrain Models from Airborne Laser Scanner data - A grid based approach*. Graz (Austria), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 293-296.
- Walker Morin, K., 2002. *Calibration of Airborne Laser Scanners*, Calgary (Canadá): University of Calgary.
- Wang, C.-C., ed., 2011. *Laser Scanning, Theory and Applications*. Primera ed. Rijeka (Croacia): InTech.
- Weber, M., Herrmann, J., Hajnsek, I. & Moreira, A., 2006. *TerraSAR-X and TanDEM-X: Global Mapping in 3D using Radar*. Antwerp (Bélgica), Second International Workshop "The Future of Remote Sensing".
- Wehr, A. & Lohr, U., 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Issue 54, pp. 68-82.
- Wehrli, 2013. *Wehrli & Associates Inc.*. [www.wehrliassoc.com](http://www.wehrliassoc.com). Último acceso: Febrero 2013.
- Wiseman, J. & El-Baz, F. edits., 2007. *Remote Sensing in Archaeology*. Primera ed. Boston (EE.UU.): Springer.
- Yan, M., Blaschke, T., Liu, Y. & Wu, L., 2012. An object-based analysis filtering algorithm for airborne laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 33(22), pp. 7099-7116.

Yan, W. Y. & Shaker, A., 2010. *Radiometric calibration of airborne LiDAR intensity data for land cover classification*. Calgary (Canadá), Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS.

Yunfei, B. y otros, 2008. Classification of LiDAR point cloud and generation of DTM from LiDAR height and intensity data in forested area. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(Part B3b), pp. 313-318.

Z+F, 2013. *Zoller-Fröhlich*. [www.zf-laser.com](http://www.zf-laser.com). Último acceso: Febrero 2013.

Zhang, K. y otros, 2003. A progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne LIDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Issue 41, pp. 872-882.

Zhang, X., Morris, J. & Klette, R., 2005. *Volume Measurement Using a Laser Scanner*, Auckland (Australia): The University of Auckland.

Zupt, LLC, 2012. *Integrated Inertial Positioning Systems*. [www.zupt.com](http://www.zupt.com). Último acceso: Diciembre 2012.



Bloque V

# ANEXOS



## Anexo A

# Fundamentos de la medición láser

## A.1. Introducción

Los sensores láser están basados en técnicas de medición activas, es decir, emiten algún tipo de radiación controlada (radio, ultrasónica u óptica) y detectan su reflexión con el fin de registrar la distancia a un objeto. Si se desean obtener altas precisiones en la medida de estas distancias, se deberían elegir señales ópticas porque las señales radio o ultrasónicas no pueden ser enfocadas adecuadamente. Las principales ventajas de los sistemas activos es que no requieren luz ambiental, ya que generan su propia radiación, proporcionando gran cantidad de mediciones de manera automática, en poco tiempo y sobre cualquier tipo de superficie. Además, no necesitan contacto sobre el objeto, pudiendo medir casi sobre cualquier superficie, aunque algunos sistemas activos pueden verse afectados por fuentes de luz externas, reflexividad, color o rugosidad.

La división de los sistemas activos basados en señales ópticas atiende a cómo reciben y/o analizan la señal de radiación reflejada.

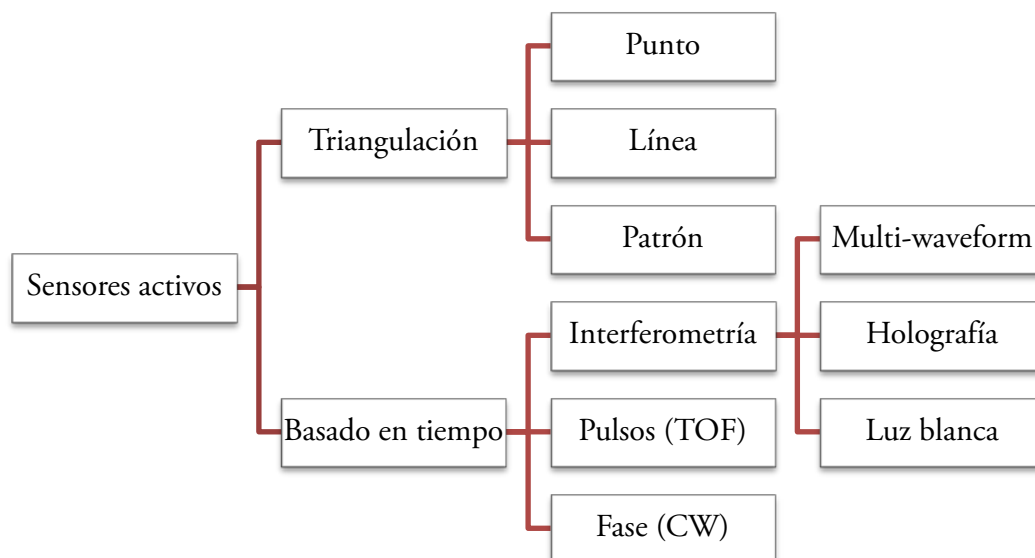










Figura 322: División de los sensores activos basados en señales ópticas.



Tabla 35: Comparación entre sistemas ópticos de medición de distancia activos.

	Interferometría	Triangulación	CW	TOF
Distancia máxima	Micras	De milímetros a pocos metros	De centímetros a 200 m	De metros a varios kilómetros
Precisión	Dependiente de la longitud de onda	Dependiente de la distancia al cuadrado	Dependiente de la distancia	Dependiente de la distancia
Post-proceso				
Costes económicos				

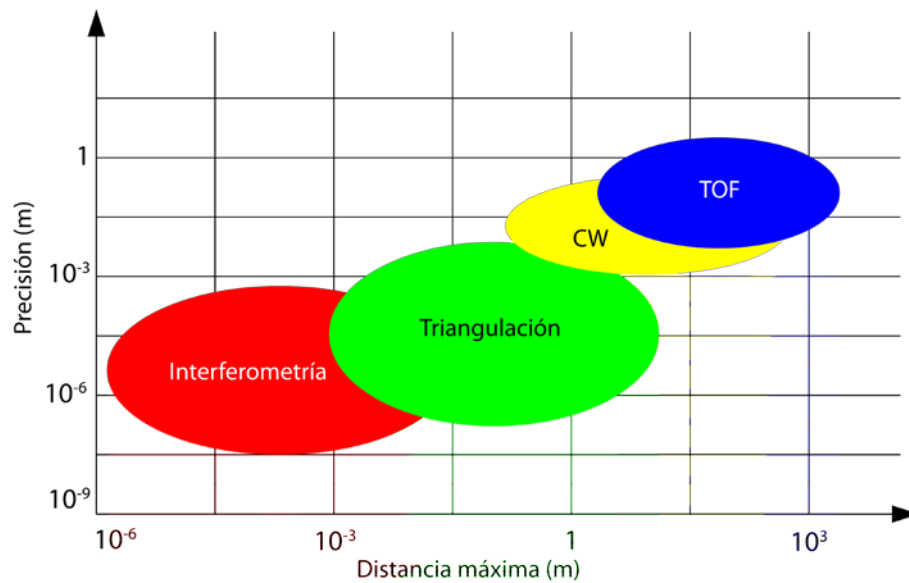


Figura 323: Gráfico comparativo de precisión/distancia máxima entre sensores ópticos activos de medición de distancia.

A continuación, se explica el proceso de medición de cada una de las técnicas: triangulación, interferometría y medición de tiempo. Se hará énfasis en esta última técnica por ser los más utilizados en Topografía, diferenciando entre escáneres basados en pulsos (tiempo de vuelo) y escáneres basados en diferencia de fase. Por último, se hace referencia a sensores que mezclan registro multispectral y de distancias (Cámaras láser 3D) y algunas mejoras introducidas en la medición mediante pulsos (análisis full-waveform y múltiples pulsos simultáneos).

## A.2. Triangulación

La triangulación es el método más antiguo para la determinación de la posición de puntos remotos utilizada por muchas técnicas, incluso por cámaras tridimensionales. Los escáneres basados en triangulación utilizan la trigonometría para el registro de la posición tridimensional de puntos mediante el envío de un determinado patrón de luz sobre el objeto que se registra por medio de una cámara. Tanto el emisor de luz como la cámara se encuentran situados a una determinada distancia y con una determinada inclinación, formando un triángulo con el objeto donde se proyecta el patrón de luz, de ahí el nombre de la técnica. En esta técnica, el láser no se utiliza para medir la distancia sino para crear un patrón de luz que se proyecta sobre el objeto.

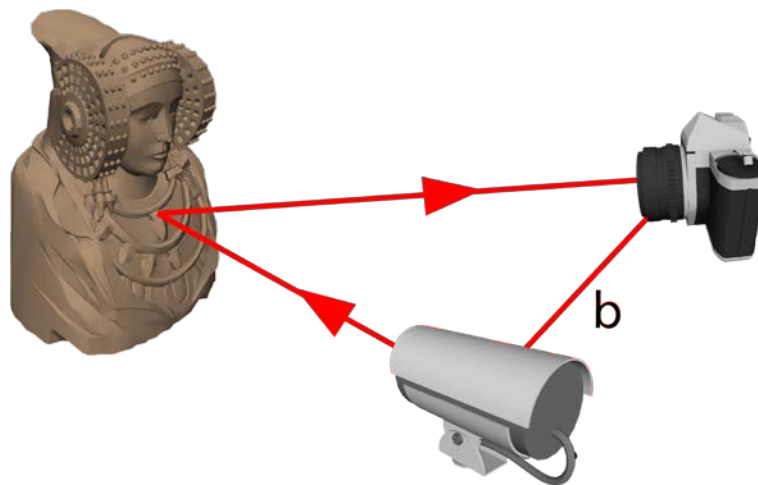


Figura 324: Registro mediante triangulación.

La geometría podría ser la siguiente. Se alinea una cámara a lo largo del eje Z con el centro de las lentes localizadas en  $(0, 0, 0)$ . A la izquierda de la cámara y a una distancia  $b$  se sitúa un proyector de luz que enviará un haz de rayos a un ángulo variable  $\theta$  relativo al eje X definido por la línea base. El punto  $(x, y, z)$  se proyecta en la imagen digitalizada en el pixel  $(u, v)$  de tal forma que, por triángulos semejantes, se tiene:

$$u \cdot z = x \cdot f \quad v \cdot z = y \cdot f$$

Donde  $f$  es la distancia focal de la cámara en píxeles. Por tanto, las cantidades medidas  $(u, v, \theta)$  se utilizan para calcular las coordenadas  $(x, y, z)$ . Tanto la longitud de la base como el ángulo en el emisor son conocidos, por lo que la posición del punto se determina por el ángulo formado en la cámara.

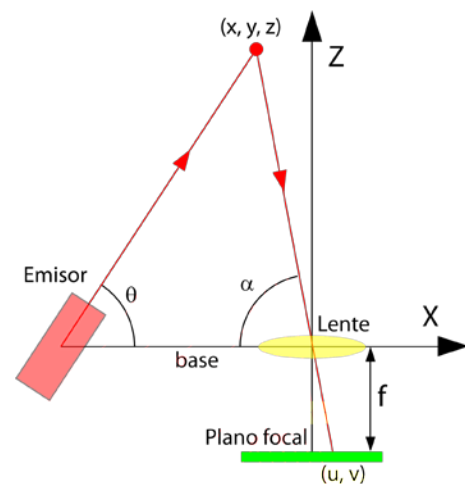


Figura 325: Principio de la medición láser mediante triangulación.

$$[x, y, z] = \frac{b}{f \cot \theta - u} [y, v, f]$$

Según la Trigonometría, cuando mayor sea la base  $b$  mayor será la precisión en la medida del punto. Sin embargo, el factor determinante para la precisión es la capacidad de medir de manera precisa el ángulo  $\theta$  y la posición horizontal  $u$ . Además, aumentar la base podría producir que no hubiera solape entre la luz proyectada por el emisor y la imagen capturada por la cámara. Por tanto, la distancia de actuación de estos escáneres no es superior a 10 m, pero las precisiones que alcanzan en la medida pueden ser del orden de micras (Besl, 1988).

La luz proyectada por el emisor se puede estructurar de varias formas: como un punto, una línea, un patrón binario o un patrón de tiras de color. En el caso de luz proyectada como un punto, se tiene la posibilidad de medir la intensidad de respuesta, por lo tanto, se puede diferenciar el material medido (figura 324). En el caso de la proyección de línea, ésta se marcará como un perfil sobre el objeto siendo registrada por la cámara (figura 326). Tanto en la luz estructurada en puntos o como en líneas, el movimiento para cubrir todo el objeto se realiza mediante un espejo rotatorio. En el caso de los escáneres basados en patrón, proyectan un conjunto de líneas o franjas binarias sobre el objeto de tal forma que no es necesario ir moviendo el emisor de luz sobre el objeto para cubrirlo, permaneciendo estático (figura 327).

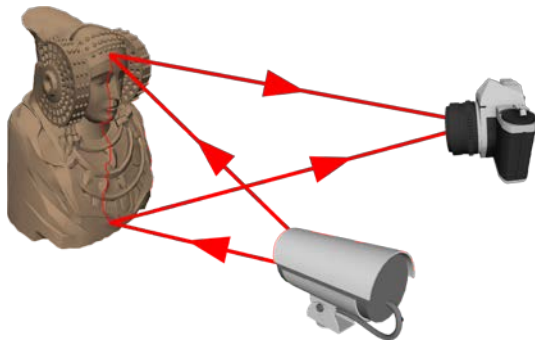


Figura 326: Triangulación utilizando línea.

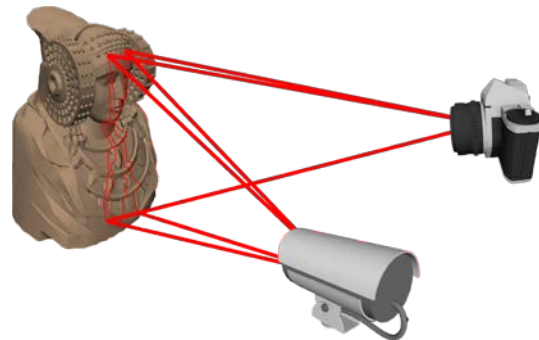


Figura 327: Triangulación utilizando patrón.

El método de triangulación láser (método activo) funciona de forma parecida al modelo fotogramétrico (método pasivo), en el que se tienen dos imágenes del objeto desde dos perspectivas diferentes. La manera de realizar la correspondencia de dos puntos homólogos es mediante la medida automática o asistida y aplicando constricciones geométricas; por ejemplo, que ambos puntos se encuentren en el mismo plano epipolar.

En el caso de la triangulación láser, se sustituye una de las imágenes por el patrón que el emisor proyecta sobre el objeto por lo que se pueden calcular las coordenadas del punto proyectado en el objeto buscando

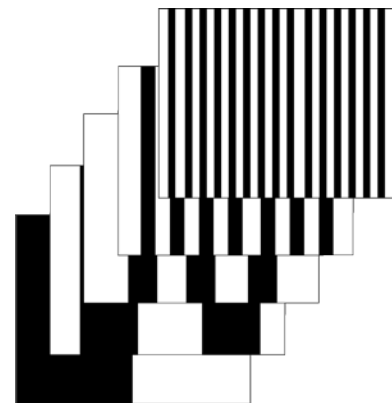
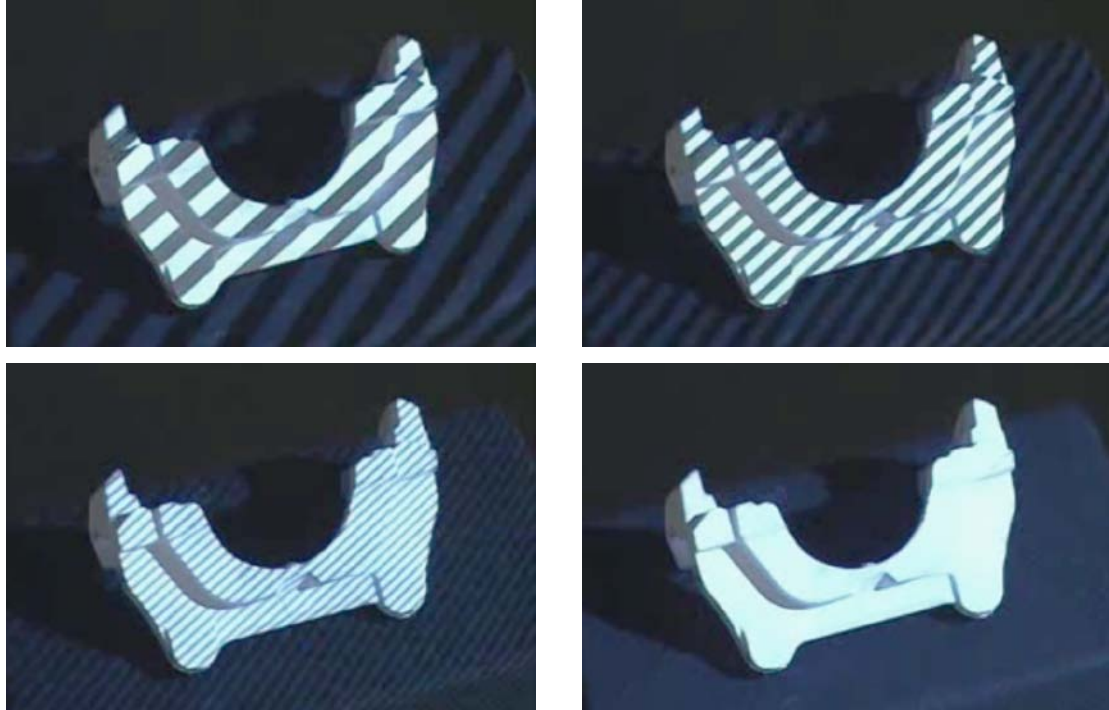


Figura 328: Ejemplos de patrones basados en franjas binarias.

sobre dicho patrón conocido.

Tabla 36: Proceso de registro mediante un escáner basado en triangulación de franjas binarias (NUB3D, 2013).



Una vez que la cámara ha registrado la secuencia de patrones proyectados sobre el objeto, es posible registrar una imagen, registrando el color RGB del objeto. De esta forma, posteriormente se podrá combinar la información geométrica y la radiométrica.

En el apartado B.3.3, se detallan algunos sensores comerciales que utilizan este principio de medición, cuya principal aplicación es el diseño y control dimensional de mecanizados y piezas industriales. También existen modelos para el registro de otro tipo de objetos, como piezas arqueológicas o monumentos (Cano, et al., 2010).

### A.3. Interferometría

Un interferómetro es un instrumento de medición que funciona produciendo interferencias, normalmente, a través de luz coherente procedente de sensores láser. Hay muchos tipos, algunos de los cuales se usan para la espectrometría. La mayoría de ellos tiene un espejo semitransparente que envía dos mitades de un haz de luz a lo largo de caminos diferentes. Cuando los haces de luz se reúnen, interfieren para formar franjas que corresponden a la diferencia entre los caminos ópticos. Debido a que los cambios en la fase son proporcionales a las diferencias en el camino óptico, se puede medir la distancia como fracciones de longitud de onda.

Una de las posibilidades es la interferometría holográfica. Un holograma es una imagen tridimensional que se ha producido utilizando un láser. La luz del láser se separa en dos haces y, a través de un espejo, uno de ellos refleja el objeto hacia el detector y, a través de otro espejo, el otro lo envía al detector sin encontrarse el objeto. El detector se coloca donde los dos haces se intersectan, de tal manera que revela el holograma. La holografía fue descubierta en la década de 1960 y los principios de la interferometría holográfica casi veinte años después.

La interferometría holográfica permite la detección de deformaciones muy pequeñas, del orden de la décima de longitud de onda. Además, contando el número entero de longitudes de onda, se pueden medir grandes distancias con baja ambigüedad. Gracias a la intensidad y coherencia proporcionada por los sensores láser, la interferometría es una técnica rápida, de alta precisión (mayor que los escáneres basados en tiempo de vuelo) y versátil en la medición de largas distancias.

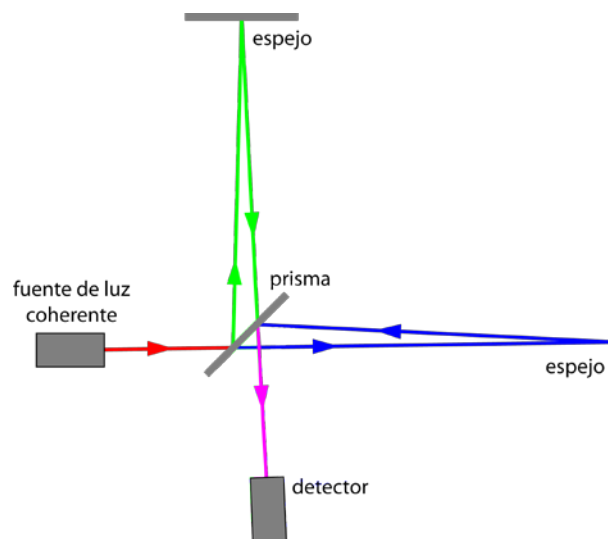


Figura 329: Esquema de un sensor de interferometría láser (Lerma & Biosca, 2008).

En este tipo de escáneres y como muestra la figura 329, el haz láser se divide utilizando un prisma que refleja cada mitad hacia direcciones diferentes (brazo de referencia y brazo de medición), encontrándose posteriormente.

## A.4. Medición de tiempo

Los escáneres de medición basados en tiempo son activos y miden el intervalo de tiempo entre dos sucesos. Es la técnica utilizada en sensores aerotransportados y para la medición de batimetría. En general, hay dos principios de medición por tiempo: escáneres basados en pulsos (tiempo de vuelo o TOF) y basados en fase (CW).

Todos los sensores aéreos utilizan el sistema de medición mediante pulsos o tiempo de vuelo. Como excepción, señalar uno de los primeros desarrollos, realizado por la Universidad de Stuttgart en 1997 que utilizaba fase. Se denominaba ScaLARS (*Scanning Laser Altitude and Reflectance Sensor*).

Estos sistemas suelen utilizar semiconductores para producir los pulsos láser, los cuales son cortos pero de alta potencia, con colimación elevada y en una estrecha banda del espectro. Esta última cualidad es importante ya que permite colocar filtros antes de la recepción de la señal que evitan la entrada de radiación proveniente de otras fuentes, como podría ser el reflejo del sol.

### A.4.1. Características generales

#### A.4.1.1. Pulso

Un pulso que viaja desde la fuente que lo ha generado hacia un objetivo se puede definir por su longitud, diámetro o intensidad. La duración del pulso es muy breve ( $\tau$ ), pero no infinitesimal, y su forma dependerá del instrumento utilizado (Moreno, 2007).

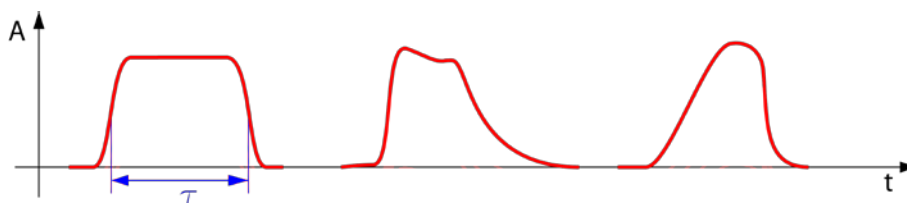


Figura 330: Algunas formas típicas de un pulso.

La longitud del pulso ( $\delta$ ) se obtiene multiplicando la velocidad de la luz láser (que es aproximadamente 0.03% más lenta que la velocidad de la luz, aproximadamente 310800 km/s) por el tiempo ( $\tau$ ):

$$\delta = c \cdot \tau$$

Por ejemplo, un pulso de 10 nanosegundos (ns) equivale a una longitud de unos 3 m.



Como muestra la figura 331, el diámetro del rayo sobre el terreno dependerá del ángulo de divergencia  $\gamma$  y de la altura de vuelo  $h$ .

Este ángulo de divergencia depende, a su vez, de la longitud de onda y el diámetro de apertura, existiendo una relación mínima teórica de:

$$\gamma \geq 2.44 \frac{\lambda}{D}$$

Por ejemplo, para unos valores estándar de longitud de onda de 1064 nm y diámetro de apertura de 10 cm, se tendría un ángulo de divergencia de 0.026 mrad. Los valores habituales para ALS se sitúan entre 0.08 mrad y 1 mrad.

Para distancias largas, la relación entre el área iluminada, suponiendo que ésta fuera un círculo, vendría dada por la siguiente expresión, que ofrece el diámetro del rayo en tierra:

$$D_I = D + 2h \tan(\gamma / 2) \approx 2h \tan(\gamma / 2) \approx h\gamma$$

Por tanto, utilizando el valor anterior y suponiendo una altura de 1000 m, se tendría una huella láser de 26 cm de diámetro.

Para distancias cortas, por ejemplo en TLS, se podría utilizar la siguiente expresión:

$$D_I = D \sqrt{1 + \frac{\lambda^2 h^2}{\pi^2 D^4}}$$

En la práctica, el tamaño de la huella suele ser mayor que el ofrecido por estas expresiones debido a diversas imperfecciones en el modelo de divergencia. Sin embargo, algunos sistemas TLS, por ejemplo Trimble, permiten enfocar el haz a un mínimo para una distancia dada.

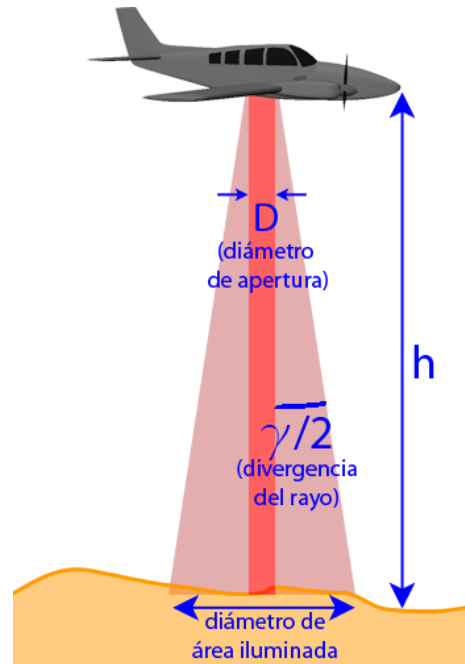


Figura 331: Diámetro del rayo sobre el terreno.

#### A.4.1.2. Longitud de onda

El haz láser tiene una alta potencia (en ALS, son de clase 4 y en TLS de clase 1 ó 3), de modo que genera energía suficiente para que pueda volver al sensor que, en el caso de sensores aerotransportados, se encuentra tan alejado como la altura de vuelo. Este haz es muy estrecho, pudiendo iluminar y medir objetivos pequeños, concentrando más energía por unidad de área. De hecho, cuanto más estrecho es el pulso mayor será la precisión en la distancia.

Al tener que usar pulsos de mucha energía, es necesario emplear longitudes de onda en las que el ojo es más sensible. Existen unas fórmulas normalizadas (Wehr & Lohr, 1999) que relacionan el tiempo del pulso, el área abarcada y la longitud de onda con la potencia de pico máxima que se puede emplear para que no haya riesgos para el ojo humano. Además, las longitudes elegidas por los fabricantes se encuentran donde la absorción en la atmósfera es menor. El rango del espectro oscila desde el ultravioleta al infrarrojo cercano.

Los diodos utilizados pueden ser sólidos, de gas, líquidos teñidos orgánicamente o semiconductores. La mayoría de los láseres de medición utilizan un compuesto de cristal de granate de itrio y aluminio dopado con neodimio (Nd:YAG), que les permite emitir con una longitud de onda de 1064 nm. Otros sensores utilizan rubí con una longitud de onda de 694.3 nm o alejandrita cuya longitud de onda es modulable (entre 701 nm y 818 nm). Algunos modelos utilizan otros componentes que generan diferentes longitudes de onda, por ejemplo, Fugro FLI-MAP a 900 nm o Riegl LMS-Q780 a 1550 nm (Pfennigbauer & Ullrich, 2011).

Normalmente, estos sistemas emiten con una única longitud de onda, a excepción de los sensores batimétricos que emiten a 1064 nm (cercana al infrarrojo) y a 532 nm (en la banda del verde), para medir tanto la superficie del agua como el fondo, respectivamente. Esta luz emitida tiene un ancho espectral muy estrecho, que está entre 0.1 nm y 0.5 nm.

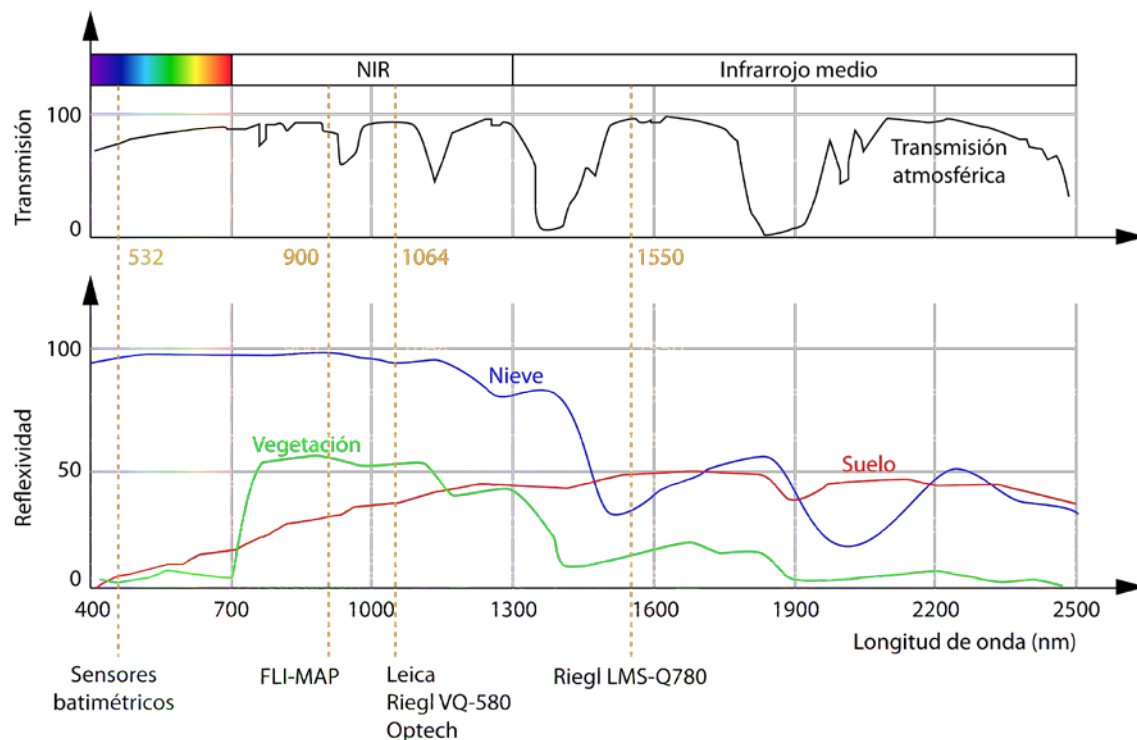


Figura 332: Longitudes de onda de algunos sensores LiDAR.

A la hora de elegir una longitud de onda, también se deben considerar las propiedades reflexivas de los objetos que se desean medir. Por ejemplo, un láser que utilice 1535 nm no es útil para medir glaciares, ya que la nieve refleja débilmente esta longitud de onda. En cambio, a 900 nm presenta una reflexividad entre el 80% y el 90%. Una longitud

de onda de 900 nm podría ser muy favorable tanto para el emisor como para el receptor, pero sería un problema para la seguridad del ojo humano. Un ejemplo de sensor especialmente diseñado para medir en hielo y nieve podría ser el Riegl VQ-580 con una longitud de onda de 1064 nm (Briese, et al., 2012).

#### A.4.1.3. Reflexividad o intensidad

Uno de los parámetros registrados por los dispositivos láser es la reflexividad generada por el objeto o el valor de la intensidad, expresado como el cociente entre la energía reflejada y la energía emitida por el láser. La intensidad disminuye conforme aumenta la distancia al origen, debido fundamentalmente a la atenuación causada por la atmósfera y el ensanchamiento del pulso conforme avanza. De hecho, la energía recibida por el sensor es inversamente proporcional a la distancia al objeto. La intensidad será máxima en el eje del rayo y mínima en los bordes. (Baltsavias, 1999)

A continuación, se muestra un ejemplo de una imagen con la intensidad registrada mediante un sensor aerotransportado. Pueden apreciarse los árboles así como la carretera que atraviesa la zona, cuyo valor de intensidad es muy bajo.



Figura 333: Nube de puntos LiDAR mostrada utilizando la intensidad.

Si se conoce la reflexividad del objeto medido para la longitud de onda utilizada, se puede aprovechar esta medida para clasificar el terreno, como hacen los sensores pasivos en teledetección. La imagen generada por los puntos registrados utilizando esta propiedad proporciona una idea de los objetos medidos. De hecho, recuerda a la imagen pancromática registrada por las cámaras ópticas donde los objetos de baja reflexión aparecen oscuros.

Sin embargo, no es sencillo clasificar los puntos utilizando únicamente este parámetro, ya que no se puede establecer una relación directa entre el valor de intensidad devuelto y el tipo de superficie. Además, la imagen generada tiene una calidad inferior a la generada por una cámara óptica.

Para ayudar en este cálculo, existen tablas donde se da una relación aproximada del valor de reflexividad y superficie, siendo diferente para cada sensor ya que depende de la longitud de onda (Song, et al., 2002).

Tabla 37: Reflexividad para un láser Riegl con longitud de onda de 900 nm (Riegl, 2013).

Material	Reflexividad (%)	Material	Reflexividad (%)
Papel blanco	Hasta 100	Carbonato de arena (seca)	57
Madera	94	Carbonato de arena (húmeda)	41
Nieve	80-90	Coníferas	Aprox. 30
Espuma de cerveza	88	Palé de madera	25
Blanco de albañilería	85	Hormigón liso	24
Piedra caliza o arcilla	Hasta 75	Asfalto	17
Periódico impreso	69	Lava	8
Papel de seda con capas	60	Neumático negro	2
Árboles de hoja caduca	Aprox. 60		

Un problema que acarrea los objetos con baja reflexividad es que influyen en la máxima distancia que se puede medir. Los fabricantes deben proporcionar las correcciones que hay que aplicar a la distancia máxima medible según las propiedades reflexivas de los objetos. Normalmente, esta corrección es proporcional a la raíz cuadrada de la reflexividad (Yan & Shaker, 2010). Por ejemplo, en la figura 334 se muestra el gráfico para la corrección de distancias de un láser de la marca Riegl.

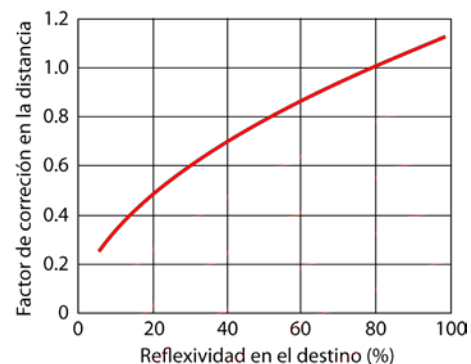


Figura 334: Factor de corrección para la distancia máxima del láser, dependiendo de la reflexividad de destino.

Se sigue investigando para poder sacar mayor partido a este parámetro y, en esta tesis, se han propuesto algoritmos que utilizan la intensidad sola o combinada con otros parámetros registrados por cada punto para poder clasificar las superficies adecuadamente. Estos algoritmos están explicados en los apartados 5.4.4 y 5.4.5.

#### A.4.1.4. Registro del eco

El registro de un eco se puede considerar como un proceso compuesto de tres fases: Recepción de la porción del rayo reflejado (receptor), amplificación de la señal (amplificador) e individuación del frente de onda, es decir, determinación del punto en el que se recibe la señal (detector).

El receptor debe identificar y definir el eco. El segundo elemento amplifica la señal recibida, teniendo en cuenta que, desde que se emite el rayo hasta que se recibe, la intensidad disminuye notablemente debido a la distancia recorrida y a la pérdida sufrida en la reflexión. El detector, junto al contador de tiempo, determina el instante en el que se recibe la señal. Esta tarea es delicada ya que de ella depende la precisión de la distancia medida.

Para superficies planas con una buena reflexividad homogénea en la huella de láser, el pulso recibido es muy similar al enviado, lo que significa poco tiempo en la parte ascendente y, por tanto, muy buena precisión en la determinación de la distancia (figura 335). No se hace promedio de distancias a varios objetos.

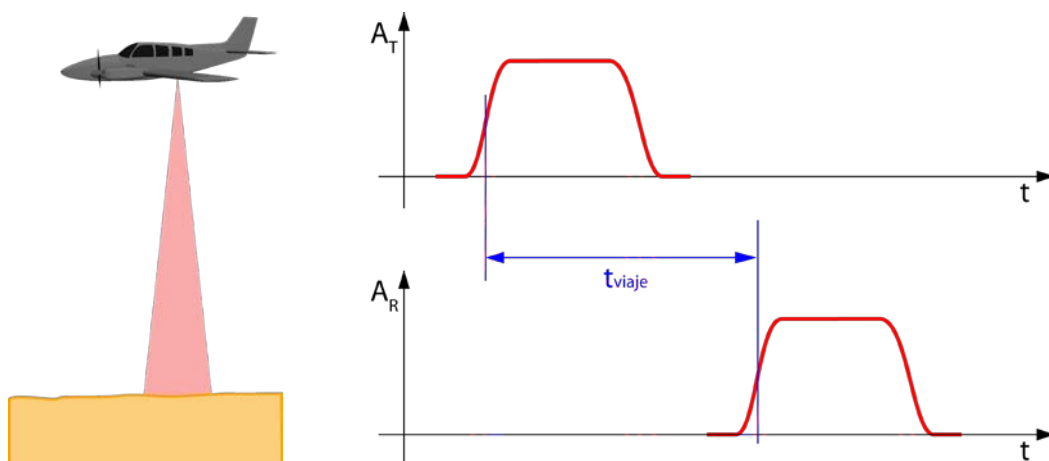


Figura 335: Reflejo sobre superficie plana. El pulso recibido es similar al emitido.

Cuando varias superficies irregulares, próximas una de otra, reflejan un pulso de entrada (figura 336), los pulsos reflejados se combinan en un pulso más amplio con una menor magnitud y más tiempo de subida, por lo que la exactitud en la medida de la distancia es menor, siendo la distancia un promedio de varios valores.

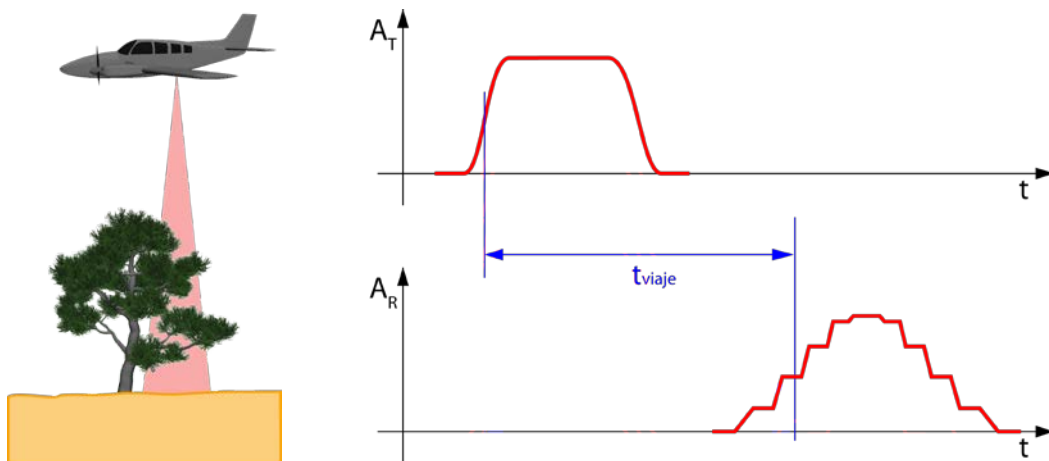


Figura 336: Reflejo sobre superficie irregular. Se reflejan varios pulsos.

La distancia medida depende de la pendiente y rugosidad de la superficie. Por ejemplo, en la figura 337, el pulso de retorno de la imagen a la izquierda es más ancho que el de la derecha y la distancia es resultado de un promedio de las distancias medidas en la huella de láser.

El tamaño mínimo de un objeto detectable depende de la reflexividad (por ejemplo, los cables de electricidad son detectables). El pulso de retorno de la figura 338 puede ser detectable si la zona roja tiene una alta reflexividad, aun cuando se refiera a una pequeña zona dentro de la huella láser.

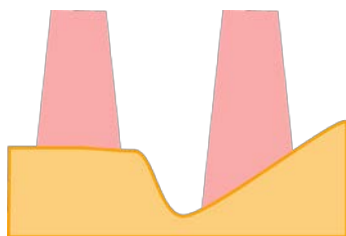


Figura 337: Haz incidiendo sobre superficies con diferente inclinación.

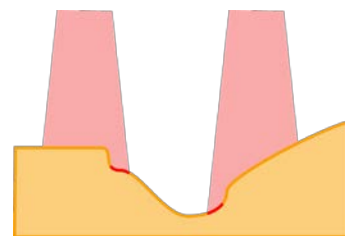


Figura 338: Haz incidiendo parcialmente sobre un objeto.

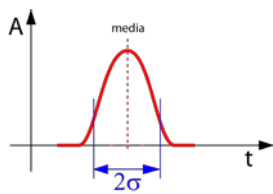


Figura 339: Pulso de respuesta de una superficie plana.

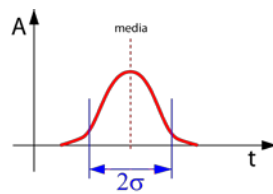


Figura 340: Pulso de respuesta de una superficie inclinada.

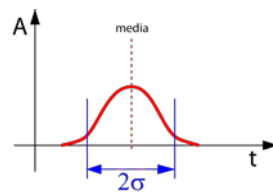


Figura 341: Pulso de respuesta de una superficie irregular.

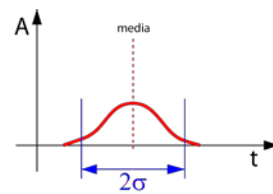


Figura 342: Pulso de respuesta de una superficie irregular e inclinada.

La penetración en el follaje empeora cuanto mayor es el ángulo de escaneo o cuanto mayor es la cantidad de hojas, por ejemplo, en árboles de hoja caduca, como muestra la



figura 343. Del mismo modo, las oclusiones también aumentan cuando mayor es el ángulo de escaneo (importante para la construcción y modelado 3D de ciudades).

Debido a la reflexión especular del agua, en zonas húmedas no se produce señal de retorno, por lo que producirán zonas vacías o con puntos erróneos, como ocurre en la figura 344.

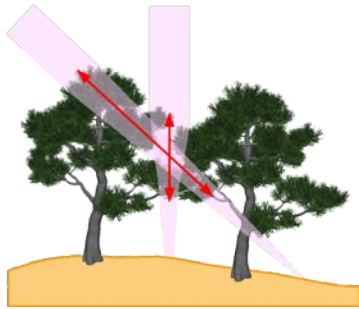


Figura 343: Haces incidiendo con ángulo diferente sobre vegetación.

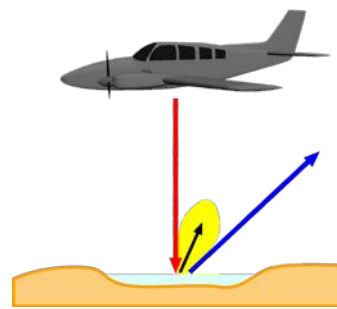


Figura 344: Reflexión del rayo sobre superficies acuáticas.

#### A.4.1.5. Registro de diferentes pulsos

Dada la naturaleza de un pulso láser y la anchura de su huella sobre el terreno, en el recorrido del rayo pueden darse varias reflexiones en diferentes puntos (figura 345). Cada una de estas reflexiones se denomina “eco” y se producen cuando las superficies de los objetos no cubren de forma completa el haz de luz, por tanto, se producirá un primer eco donde el haz choque pero, si no es cubierto completamente, seguirá viajando hasta encontrar otra superficie. Si se mide la distancia utilizando el primer eco, los puntos registrados estarán en la parte superior de las superficies: la copa de los árboles, en el alero del tejado o en las líneas eléctricas. Si la distancia es medida utilizando el último eco, los puntos registrados estarán en el tronco del árbol, en el suelo, en la carretera, en la superficie inferior, etc.

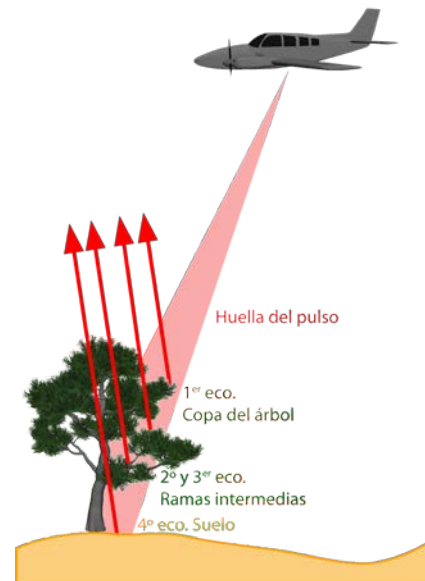


Figura 345: Diferentes ecos de respuesta.

Casi todos los escáneres láser pueden medir la distancia con ambos ecos y grabar ambos con una separación mínima de tiempo. Además, existen escáneres que pueden utilizar los ecos intermedios para la medida de distancias y determinar, de esta manera, el espectro completo de distancias para cada haz láser.

Para que se dé un eco múltiple, se requiere al menos que haya objetos a distinta cota dentro de la trayectoria del rayo láser y que tales objetos sean suficientemente grandes y

reflexivos para generar un eco significativo. Normalmente, se generan múltiples ecos con la vegetación (objetos semi-transparentes), en discontinuidades abruptas de la superficie (por ejemplo, los bordes de los edificios) y objetos colgantes (por ejemplo, líneas eléctricas).

No obstante, existen límites en el proceso de registro y, dependiendo del dispositivo, existe una separación mínima entre cada registro individual que depende de la longitud de onda. De hecho, la longitud de un pulso puede provocar que estos ecos estén superpuestos. Asumiendo un ancho del pulso de retorno de 10 ns, entonces la separación mínima entre objetos deberá ser de 3 m y la diferencia de cota mínima entre ellos será de más de 1.5 m para distinguir entre el final del primer impulso y el principio del segundo. En la realidad, la separación vertical mínima es superior. Por lo general, la magnitud del pulso es menor y su ancho mayor, no como se muestra en la figura 346.

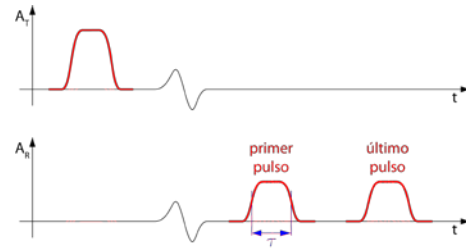


Figura 346: Múltiples pulsos.

La mayoría de los sistemas registran 4 ó 5 ecos. Aunque los más interesantes son el primero y el último, ya que se pueden utilizar para multitud de aplicaciones. Por ejemplo, en una zona forestal, se utilizaría el último pulso para generar un MDT y el primero, para estimar la altura de los árboles.

Además del terreno desnudo, son muchas las superficies que generan un único eco, es decir, que no hay diferencia entre el primero y el último. Por ejemplo, vegetación densa con una parte superior muy tupida o superficies de estructuras planas (carreteras, tejados, etc.). En cambio, hay otros objetos que son propicios a dar múltiples pulsos, por ejemplo, cables eléctricos, árboles con una copa poco densa o bordes de edificios y de árboles.

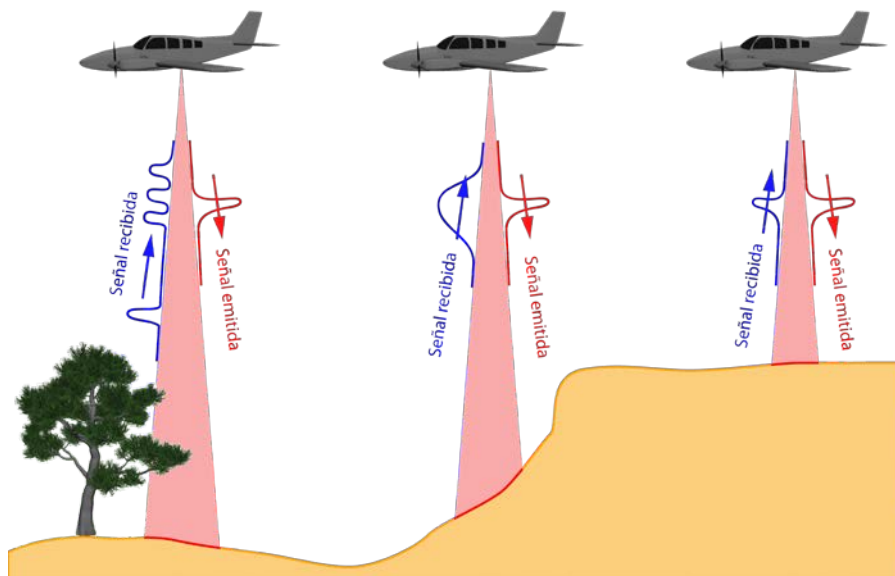


Figura 347: Diferentes tipos de respuesta en función de la superficie incidida por el rayo.

La figura 347 muestra tres casos diferentes. En el caso de la izquierda, el pulso sale del sensor y, en su camino, se encuentra con las ramas de un árbol que provoca tres pulsos que vuelven hacia el sensor. Sin embargo, no cubren por completo la huella del láser por lo que el pulso sigue viajando hasta encontrarse con el suelo y rebota el resto de pulso. En el caso del centro, el pulso rebota contra una superficie inclinada por lo que la superficie iluminada por la huella es más ancha y así lo es el pulso de retorno. En el caso de la derecha, el pulso rebota contra una superficie llana y perpendicular a este, por lo que el pulso de retorno tendrá una forma similar al emitido.

No obstante, ciertas superficies muy pulidas como pueden ser metales podrían no reflejar el rayo hacia el escáner. De hecho, el rayo podría reflejarse hacia otra dirección y rebotar contra una segunda superficie, falseando la posición del punto registrado en el escáner. Este efecto es lo que se denominó “multi-camino” (al igual que ocurre con la señal GNSS). En superficies de agua, se puede producir una fuerte absorción de la energía del rayo, por lo que la reflexión apenas tiene energía para volver al emisor. Esta absorción también depende del ángulo de incidencia, siendo mayor cuanto más se acerca al ángulo recto.

#### A.4.2. Escáneres basados en pulsos (Tiempo de vuelo)

Los escáneres TOF se basan en la medida de la distancia mediante la emisión de pulsos de láser. Registran todo su campo de visión punto a punto cambiando la dirección del haz mediante una unidad de desviación, como se explica en el apartado A.4.4. Las velocidades de registro alcanzadas oscilan entre 2000 y 250000 puntos por segundo. Los escáneres TOF tienen una alta concentración de energía transmitida, que hace posible que se alcance el ratio señal-ruido (SNR) necesario para altas precisiones en mediciones de larga distancia.

Teniendo en cuenta que el pulso debe recorrer dos veces la distancia ( $R$ ) entre el sensor y el objeto donde refleja, la duración de la distancia total recorrida es:

$$t_{\text{viaje}} = \frac{2R}{c}$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz láser (que es aproximadamente 0.03% más lenta que la velocidad de la luz, aproximadamente 310800 km/s). Por tanto, para una altura de vuelo de 1000 m, el pulso tardaría 6.4  $\mu$ s.

La precisión en la medida de la distancia se obtiene mediante la primera derivada de esta función, quedando en función de la precisión de la medida del tiempo:

$$\delta R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \delta t_{\text{viaje}}$$

Teniendo en cuenta que la frecuencia es la inversa del tiempo, la frecuencia máxima teórica de repetición del pulso que se alcanza, suponiendo que no hay superposición en la transmisión y recepción, es:

$$f_{\max} = \frac{1}{t_{\text{viaje}}} = \frac{c}{2R}$$

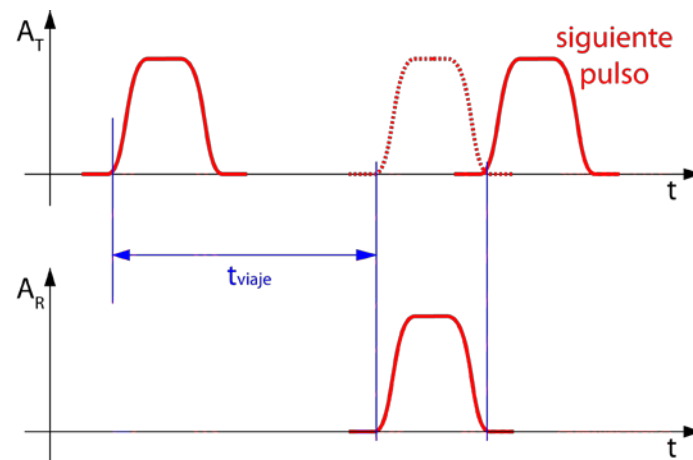


Figura 348: Tiempo entre dos pulsos consecutivos.

Por tanto, para una altura de vuelo de 1000 m, la frecuencia máxima que se alcanza es de 150 kHz, ya que el sistema debe esperar a recibir el pulso antes de mandar el siguiente, como se muestra en la figura 348. La finalidad de esta restricción es evitar la confusión en la llegada de los pulsos, lo que recibe el nombre de “máximo rango de certeza”. No obstante, para superar esta limitación de registro, desde hace varios años, existen en el mercado sensores que permiten enviar varios pulsos antes de que haya llegado el precedente. Esta tecnología está explicada en el apartado A.7.

En ALS, la amplitud o duración de un pulso ( $t_p$ ) está entre 5 ns y 50 ns. Para evitar ambigüedades, el tiempo medido debería ser mayor que esta amplitud. Por tanto, a una altura de vuelo de 1000 m, el ancho pulso tendría 1.5 m, lo que se traduce en la diferencia de altura mínima que debería tener un objeto para que el sensor pueda diferenciar dos pulsos reflejados (ecos) en la parte alta y la baja; si no, ambos pulsos se superpondrán. De hecho, uno de los inconvenientes de los escáneres TOF es la dificultad para detectar la llegada exacta de los retornos dispersos del pulso, debido a la naturaleza cambiante de las tolerancias ópticas y la atenuación atmosférica. La capacidad de medir el tiempo entre un pulso emitido y el recibido también determinará la precisión del sistema, limitada por el ruido, la fluctuación, la fuerza de la señal, la sensibilidad del detector, y la brevedad y la capacidad de reproducción del emisor del pulso.

Por otro lado, el tiempo de subida ( $t_{subida}$ ) que tiene el pulso hasta que es identificado como tal y no como ruido, no es inferior a 0.5 ns, lo que significan 15 cm a 1000 m de altura. Este valor representaría la indeterminación o precisión en la medida con pulsos. Si la superficie sobre la que reflejó el pulso es plana y perpendicular al pulso su valor será mínimo. Si la superficie es irregular, este tiempo de subida puede ser muy superior, por ejemplo, 10 ns. En el apartado A.4.1.4 se explica cómo refleja un pulso sobre diferentes tipos de superficie.

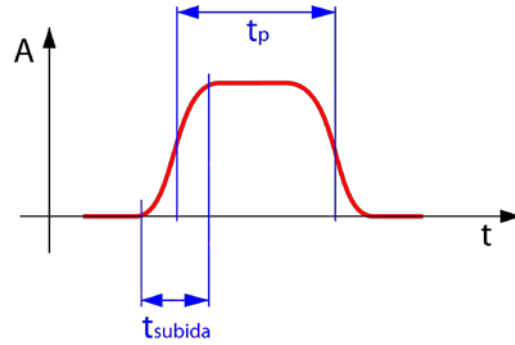


Figura 349: Amplitud y tiempo de subida de un pulso. En realidad, la forma no es trapezoidal sino gaussiana, aunque así se muestre.

En TLS, suelen durar 10 ps (picosegundos), por lo que la máxima precisión que pueden alcanzar es de 1.5 mm, aunque la mayoría de los sistemas comerciales de medio y largo alcance proporcionan una precisión entre 6 mm y 10 mm.

Según esta formulación, la luz láser recorre un metro en 3.2 ns. Si se desea calcular la distancia midiendo el tiempo en el que la luz estuvo viajando, se necesita un sistema de medición del tiempo de gran precisión, lo cual también condicionará la precisión con la que un escáner mide la distancia, independientemente de su valor. De hecho, si en TLS se desea tener precisión de 1 mm, se necesita medir el tiempo con precisión de 3 ps, aproximadamente.

### A.4.3. Escáneres basados en diferencia de fase

Aplicando el principio de la medida de diferencia de fase se pueden obtener mejores precisiones y rendimientos que con los escáneres TOF. En este caso, se utiliza una onda continua (CW, *Continuous Wave*) de láser como portadora de una señal modulada, normalmente utilizando la modulación de la amplitud (AM). La medida se realiza comparando la fase de la señal emitida y la transmitida de tal forma que se obtiene la diferencia y, con ella, la distancia recorrida, mediante la expresión:

$$R = \left( \frac{\Delta\varphi}{2\pi} + n \right) \cdot \frac{\lambda}{2} = \left( \frac{\Delta\varphi}{2\pi} + n \right) \cdot \frac{c}{2f}$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $n$  es el número completo de longitudes de onda entre el sensor y la superficie que reflejó la onda o ambigüedades,  $c$  es la velocidad de la luz láser y  $f$  es la frecuencia moduladora. Por tanto, la precisión en la medida de la distancia depende de la medida en la diferencia de fase y de la frecuencia moduladora de la onda:

$$\delta R = \frac{c \cdot \delta\varphi}{4\pi \cdot f}$$

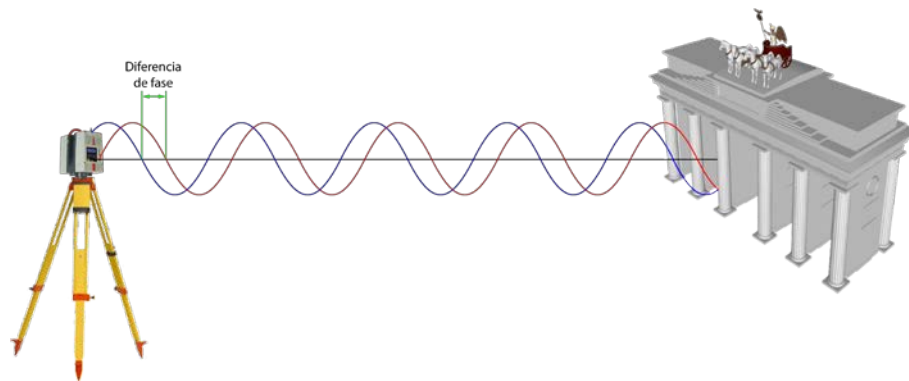


Figura 350: Principio de la medida de distancias utilizando diferencia de fase.

Por otro lado, las ambigüedades  $n$  son desconocidas, por lo que se debería utilizar una longitud de onda suficientemente grande para poder cubrir un amplio rango de distancias. Por ejemplo, utilizando una longitud de onda de 100 m, se podrían medir distancias hasta la mitad, ya que la onda va y viene, es decir, 50 m. Sin embargo, la precisión de la medida está en el orden del 1% de la longitud de onda, por lo que se tendrían una indeterminación de 50 cm. Para paliar este defecto, se suelen utilizar dos o tres longitudes de onda con valores muy diferentes para cubrir una amplia distancia pero a la vez dar suficiente precisión. La longitud de onda larga define la distancia con unicidad y la longitud de onda corta define la precisión que puede obtenerse. (Pfeifer & Briese, 2007).

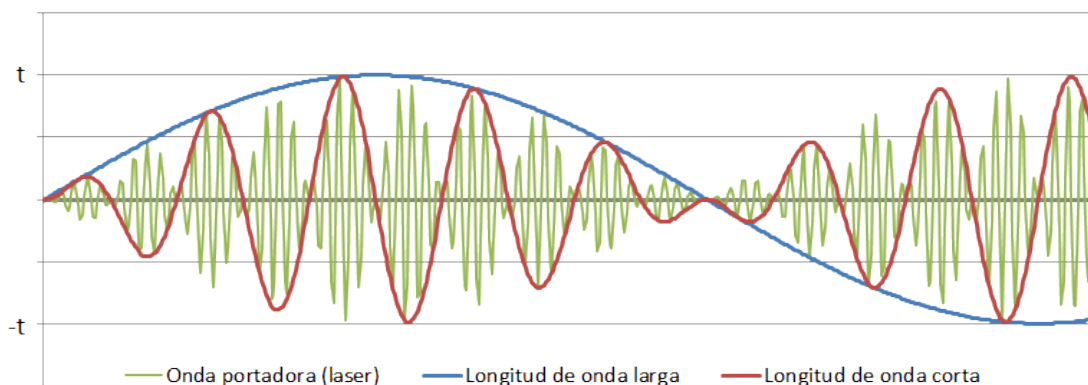


Figura 351: Diferentes longitudes de onda para medir una distancia mediante diferencia de fase.

Por ejemplo, el sensor ScaLARS utiliza dos frecuencias de modulación: Una frecuencia alta de 10 MHz ( $\lambda=30$  m) y una frecuencia baja de 1 MHz ( $\lambda=300$  m). Por otro lado, el escáner de FARO utiliza tres longitudes de onda: 1.2 m, 9.6 m y 76.8 m.

Debido a estas limitaciones de distancia máxima, este tipo de sensores se utilizan prácticamente sólo en escáneres terrestres, excepto en el sensor aéreo ScaLARS ideado por la Universidad de Stuttgart. La precisión que se puede alcanzar con este tipo de escáneres está en torno a 1 mm, es decir, tienen mejores precisiones que los basados en medición por pulso. Su velocidad de medición también es mayor pero la distancia alcanzada no supera a los TOF. Sin embargo, este tipo de sensores sólo mide un eco de respuesta de la señal lo que significa que si el haz de la onda refleja sobre una superficie irregular la distancia



medida será la media de todas las distancias que el cono del haz ha alcanzado, al contrario de lo que ocurría con los TOF.

#### A.4.4. Diferentes montajes de los sensores de barrido láser

Hasta ahora se ha visto la forma de registrar un punto por medio de un haz de luz láser, utilizando TOF o CW. Pero los sensores deben ser capaces de emitir miles de pulsos para poder registrar todo el objeto. Por tanto, el haz láser debe ser desviado para que el escáner tenga la capacidad de medir múltiples puntos desde el mismo punto de vista. En lugar de hacer rotar al escáner, se utiliza una unidad de desviación. Existen diferentes tipos de montajes realizados por los constructores para poder llevar a cabo el proceso de registro masivo de puntos.

La mayoría de los sistemas utiliza mecanismos de espejos oscilantes con incrementos de ángulo iguales, ya que es mucho más ligero y permite rotar con mayor rapidez. Sin embargo, la precisión final del barrido láser en este tipo de mecanismos suele ser peor que otros sistemas debido a errores en el movimiento de los espejos, en parte por la alta inercia que tienen. Existen mecanismos que oscilan en dos direcciones, siendo más lentos que aquellos que están oscilando continuamente, que además tienen un mejor patrón de registro de los puntos. El material utilizado para los espejos es berilio, gracias a su ligereza y rigidez. Las velocidades oscilan entre 70 y 100 Hz.

La densidad de los patrones de puntos registrados no es homogénea para ninguno de los mecanismos, siendo en algunos peor que en otros. De hecho, se generan lagunas en la cobertura del objeto medido y, en función de la huella de láser, también superposiciones. Esta es una de las razones por las que las imágenes láser (utilizando la intensidad) son peores que las imágenes registradas con cámaras ópticas.

Por otro lado, un mecanismo de desviación del láser permitiría medir en 2D convirtiendo al sistema en un perfilómetro, lo cual es perfectamente válido si este se transporta en algún vehículo en movimiento, como es el caso de ALS o MMS. Sin embargo, en TLS se desea tener un campo de vista 3D. Existen dos posibles métodos para conseguir esto. Primero, utilizar dos mecanismos de desviación del haz láser sincronizados, montados sobre los escáneres denominados “de ventana”. El FOV de estos sistemas suele estar limitado, por ejemplo,  $80^\circ \times 80^\circ$ . Segundo, que un sistema de desviación sea montado sobre una plataforma en movimiento (al igual que ocurre en ALS o MMS), es decir, una cabezal rotatorio montado sobre los escáneres denominados “panorámicos”. De esta manera, se consigue un FOV de  $360^\circ \times 80^\circ$ . Además, podría existir una tercera opción que sería la combinación de las dos anteriores, es decir, un espejo que desvíe en dos direcciones montado sobre un cabezal rotario. Estos escáneres son denominados “hemiesféricos”, como es el caso del Leica ScanStation.

A continuación, se exponen los más frecuentes: espejo oscilante, polígono rotante, espejo oscilante “palmer scan” e interruptor de fibra.

#### A.4.4.1. Espejo oscilante

Este mecanismo consiste en un espejo que oscila desviando los pulsos a la línea transversal a la dirección de vuelo. Cuando gira hacia un lado, se toma una línea y, al oscilar hacia el otro lado, se miden los puntos de la siguiente línea debido al avance del avión. Pero estas líneas no serán paralelas, sino que irán formando un zigzag comprimido o forma sinusoidal. Tienen un FOV limitado, por ejemplo, de  $40^\circ$ . Una combinación de dos espejos permite la desviación del haz en dos direcciones.

La densidad transversal dependerá de la frecuencia del láser y de la velocidad angular del espejo. En cambio, la densidad longitudinal no será exactamente constante al ir midiendo en zigzag, pero seguirá siempre el mismo patrón dependiendo de la velocidad del avión y del periodo de una línea de escaneo.

Tanto Leica como Optech utilizan este mecanismo en sus sensores.



Figura 352: Mecanismo del espejo oscilante.

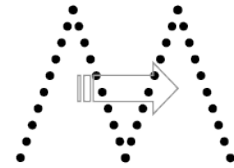


Figura 353: Patrón de puntos medidos en zigzag.

#### A.4.4.2. Polígono rotante

Para aumentar la velocidad de la unidad de desviación y reducir la complejidad de girar un espejo y luego volver atrás, se ha logrado un prisma óptico reflectante que rota. Este principio necesita sólo una dirección de rotación y, por tanto, es más rápido. Consiste en un polígono cuyas caras externas son espejos, de tal forma que el giro del polígono reflejará el rayo siempre hacia el mismo lado. En este caso, las líneas escaneadas van a ser paralelas. El FOV también está limitado a  $40^\circ$ . Ahora, la densidad longitudinal será constante para todo el escaneo y la densidad transversal será prácticamente uniforme, con un comportamiento muy similar al de los sistemas de espejo oscilante. Riegl fabrica sus sensores con este mecanismo.

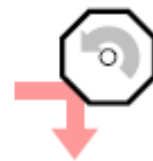


Figura 354: Mecanismo del polígono rotante.

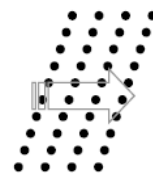


Figura 355: Patrón de puntos medidos en líneas paralelas.

#### A.4.4.3. Espejo oscilante “Palmer Scan”

Este mecanismo poco tiene que ver con los anteriores. El espejo hace un movimiento similar al de precesión, de manera que desvía los rayos formando elipses en el terreno. Por tanto, la densidad de puntos será variable, aumentando transversalmente desde el centro hacia los bordes. Longitudinalmente será más o menos constante, pero habrá irregularidades ya que conforme avanza el avión, se superpone la parte delantera de la elipse con la trasera.



Figura 356: Mecanismo del espejo oscilante Palmer Scan.

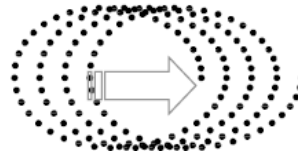


Figura 357: Patrón de puntos medidos con forma elíptica.

Sin embargo, la densidad de puntos al final del barrido es mayor, lo cual contribuye a mejorar la conexión de pasadas vecinas superpuestas. Sensores que utilizan este mecanismo son los construidos por TopEye y AHAB, ambas suecas.

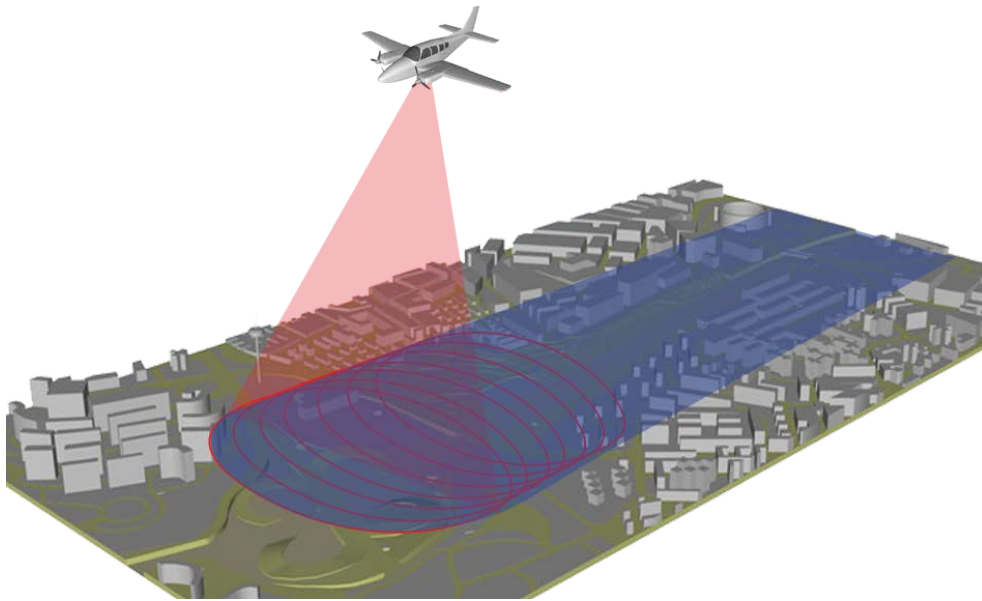


Figura 358: Esquema de medición de los puntos con el mecanismo Palmer Scan.

#### A.4.4.4. Interruptor de fibra

Recientemente, se ha introducido el uso de la fibra para conseguir sistemas más flexibles. Estos sistemas desvían el haz láser a un círculo de fibra óptica dispuesto en el plano focal mediante un espejo rotatorio. Luego, las fibras ópticas, hasta 128, transportan el haz de luz en cualquier dirección requerida. La óptica y el *array* de fibras son idénticos para el transmisor y el receptor. En el primero, un espejo rotante conduce el pulso desde la fibra central hasta la correspondiente del *array*. En el receptor, un espejo similar, sincronizado con el anterior, refleja el pulso que entra por la fibra correspondiente del *array* hasta la central. El número de puntos en una línea de escaneo será igual al número de fibras del *array*. Por tanto, el espaciado transversal depende de este número, del ángulo abarcado por el láser y de la altura de vuelo. Las líneas escaneadas van a ser paralelas entre sí y casi perpendiculares a la dirección de vuelo.

La proporción de pulsos láser no está vinculada con el ángulo de vista, pudiendo obtener un patrón de escaneado muy denso y regular. Además, no es necesaria una

calibración tras el ajuste de fábrica, pudiendo realizar una montura del láser tanto hacia delante como lateral.

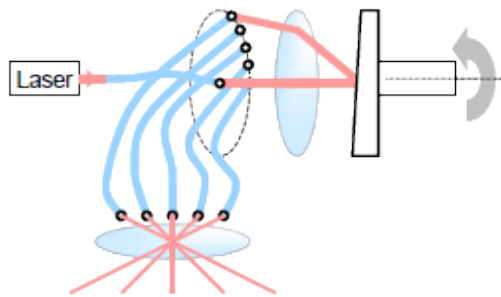


Figura 359: Mecanismo de interruptor de fibra.

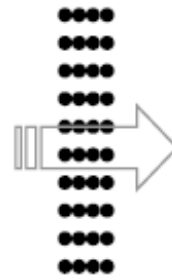


Figura 360: Patrón de puntos medidos en líneas paralelas.

Este sistema era utilizado por el antiguo modelo Falcon de TopoSys, ahora perteneciente a Trimble.

## A.5. Cámaras láser 3D

Existe en el mercado una amplia gama de cámaras que fusionan la medida de distancias y características propias de sensores de imagen. Se las conoce bajo varias denominaciones como RIM (*Range IMaging*), cámaras de profundidad, flash LiDAR, cámaras TOF o cámaras RGB-B. Están compuestas por un sistema activo (por pulso, fase o luz estructurada), óptica y un sensor de imagen (CCD o CMOS). Por tanto, proporcionan imagen (a veces de color) y pueden medir la distancia con los principios ya vistos de triangulación, TOF o CW (Remondino, 2011). Sólo miden a distancias cortas y tienen errores sistemáticos y no sistemáticos, por lo que existen varios estudios que intentan calibrar estos sensores para mejorar su productividad (Oggier, et al., 2005).

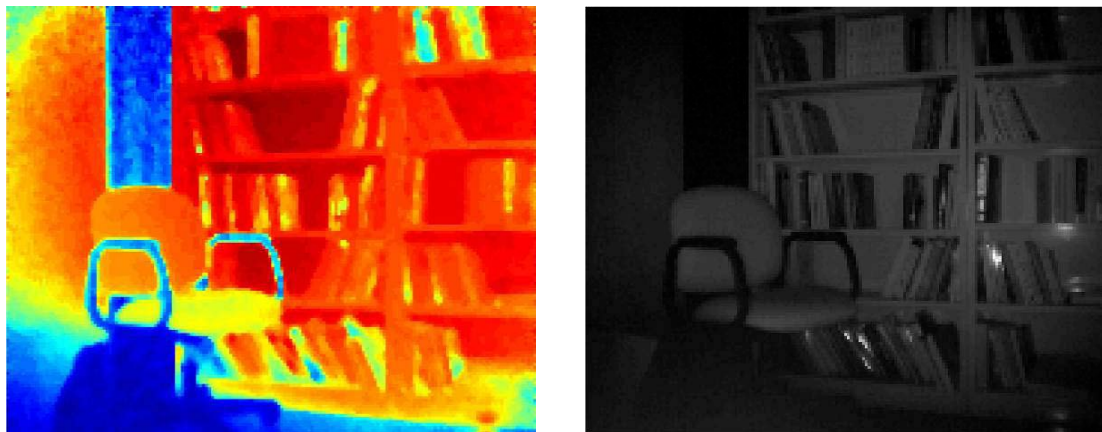


Figura 361: Imágenes registradas con una cámara RIM. La imagen de la izquierda tiene color según distancia. La imagen de la derecha son los valores de gris de la intensidad.

Algunos sensores en el mercado son:

- Panasonic D-IMager: Mide distancias mediante CW hasta 9 m con una resolución de 3 cm. La resolución de la imagen es de 160 x 120 píxeles a una velocidad de 30 FPS. Su precio aproximado es de 2200 € (Panasonic, 2013).
- Mesa Swiss Ranger 4000: Mide distancias mediante CW hasta 8 m con una precisión de 1.5 cm. La resolución de la imagen es de 176 x 144 píxeles a una velocidad de 54 FPS. Su precio aproximado es de 7500 € (Mesa Imaging, 2013).
- Microsoft Kinect: Este dispositivo pensado como accesorio de la plataforma de videojuegos Xbox, ahora está disponible para Windows. Mide distancias mediante triangulación hasta 6 m con una precisión de 1.3 mm, gracias a un sensor desarrollado por PrimeSense. La resolución de la imagen es de 640 x 480 píxeles a una velocidad de 30 FPS mediante un sensor CMOS. Su precio aproximado es de 200 € (Microsoft, 2013).
- PMD CamCube 3.0: Mide distancias mediante CW hasta 7 m con una precisión de 3 mm. La resolución de la imagen es de 200 x 200 píxeles a una velocidad de 40 FPS. Su precio aproximado es de 10000 € (PMD, 2013).



Figura 362: Panasonic D-IMager.



Figura 363: Mesa SwissRanger 4000.



Figura 364: Microsoft Kinect.



Figura 365: PMD CamCube.



## A.6. Análisis *full-waveform*

Como se ha visto en el apartado A.4.1.5, los sistemas LiDAR basados en pulsos pueden llegar a registrar varios ecos de respuesta debido al reflejo del haz sobre varios objetos que tengan menos superficie que la huella del haz. La forma de detectar cada uno de los pulsos por el hardware no suele ser desvelada por los fabricantes, pero suele estar basada en un método de detección mediante un umbral (Kim, 2009). Si el pulso de respuesta supera un determinado umbral se considera un eco. Este método puede llevar a una errónea detección de pulsos y pueden producirse errores de hasta 30 cm en la posición de un punto. Además, como se ha demostrado en el apartado A.4.2, la diferencia de cota entre las superficies que reflejaron dos ecos debe ser superior a 1.5 m.

El registro *full-waveform* permite superar estas limitaciones, mejorando la precisión, fiabilidad y resolución del registro de varios ecos. Además, esta información adicional permitirá tener datos sobre la estructura y propiedades físicas de la superficie que está reflejando. La cantidad de información registrada es cinco veces superior a un sistema LiDAR normal por lo que la frecuencia de registro es menor, existiendo un límite físico de almacenamiento. Por ejemplo, el sistema Optech ALTM puede registrar hasta 440 medidas por cada pulso emitido (Mallet & Bretar, 2009).

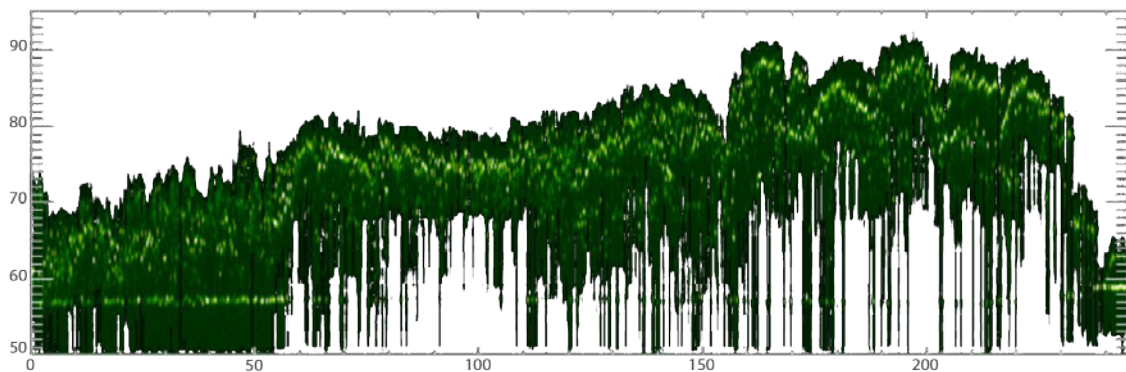


Figura 366: Ejemplo de un perfil con árboles registrado mediante *full-waveform*.

Prácticamente todo los constructores de sensores LiDAR permiten el registro de *full-waveform*, como se detalla en el apartado B.1. La mayoría utiliza una huella láser pequeña (entre 0.2 m y 3 m) con un alto PRF lo que proporciona una alta densidad de puntos y una alta definición altimétrica. Sin embargo, no se puede asegurar que el rayo llegue hasta el suelo en zonas de vegetación densa, por lo que se podrían obtener resultados imprecisos. Por el contrario, se podría utilizar una gran huella láser (entre 10 m y 70 m), incrementando la posibilidad de que el haz llegue al suelo; sin embargo, los pulsos de respuesta serían la combinación de los diferentes objetos que ha encontrado. Esta última forma de medir suele ser la opción elegida por sensores equipados en satélites, cuyos pulsos tienen una baja frecuencia y alta energía, puesto que la altura de vuelo es elevada.

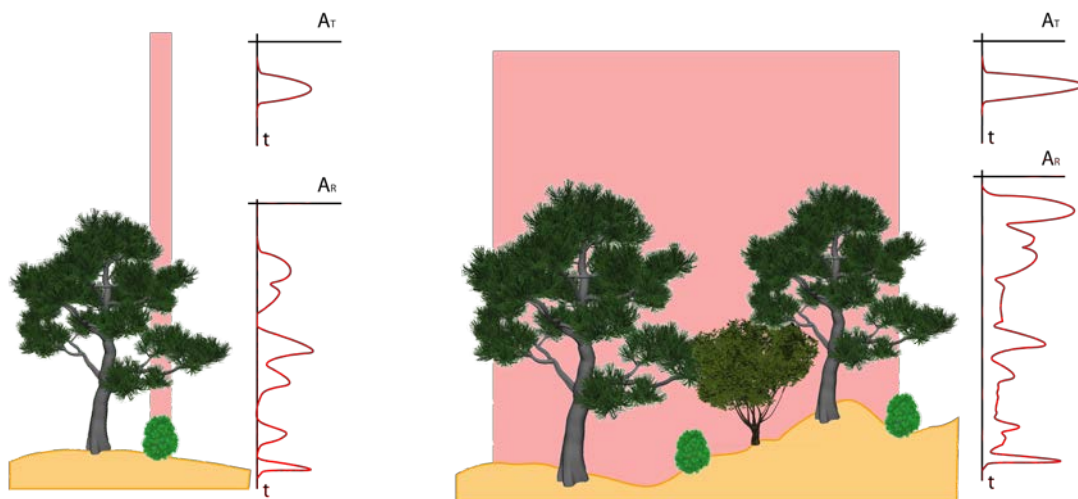


Figura 367: Señal *full-waveform* recibida mediante una señal de huella estrecha (izquierda) y de huella ancha (derecha).

Para procesar este tipo de información, lo más habitual es descomponer la información en la suma de ecos para poder caracterizar los objetos a lo largo de la trayectoria del haz láser. De esta forma, se podrán detectar picos y se podrá densificar la nube de puntos 3D siendo de utilidad para clasificar la información tanto en entornos forestales como urbanos. Se pueden diferenciar superficies con diferencias de 15 cm (Bretara, et al., 2008).

Existen varios factores que modifican la señal *waveform*: Distancia al sensor y ángulo de emisión, rugosidad del material, geometría de la superficie, radiometría y otros factores.

La aplicación principal del registro *full-waveform* está en los análisis de la cubierta vegetal, ya que se pueden calcular varios parámetros forestales como la extracción de árboles en áreas pequeñas, calcular su altura y diámetro, su volumen, diámetro de rama, clasificarlos por especies y otros parámetros como índice de crecimiento o si han sido talados. Existen proyectos que intentan sacar provecho del registro *full-waveform* en entornos urbanos pero sólo es posible en aquellos rayos que reflejan en el borde del edificio y siguen viajando hasta el siguiente objeto.

También tiene aplicación en el reconocimiento de lugares de valor arqueológico, debido a la frondosidad que han cubierto algunos de los restos arqueológicos y que han imposibilitado su descubrimiento utilizando otras técnicas de medición como la fotogrametría o la topografía (Doneus & Briese, 2006).

Sin embargo, la técnica apenas tiene diez años, por lo que se siguen desarrollando algoritmos para aprovechar toda la información que proporciona este tipo de registro. Por ejemplo, se está estudiando la manera de extraer el tipo de material donde reflejó la onda, para lo cual se debe eliminar el efecto que produce la geometría y la radiometría del objeto.

## A.7. Múltiples pulsos simultáneos

Esta nueva tecnología existe en el mercado desde 2007 y permite utilizar los sistemas LiDAR aerotransportados a mayores frecuencias de pulso que con sensores convencionales. Puede recibir distintas denominaciones: Leica lo denomina MPiA (*Multiple Pulses in Air*), Optech utiliza CMP (*Continuous MultiPulse*) y Riegl utiliza el término MTA (*Multi-Time-Around*). Como se ha explicado en el apartado A.4.2, para una altura de vuelo de 1000 m, el tiempo que tarda el pulso en viajar (ida y vuelta) es de 0.0064 segundos, la máxima frecuencia PRF a la que podría trabajar el sensor sería de 155 kHz. Sin embargo, esta nueva tecnología se basa en el hecho de permitir que el sistema LiDAR pueda disparar un segundo pulso láser antes de la recepción de la reflexión del pulso anterior, por lo se puede duplicar la frecuencia del pulso en cualquier altitud dada (figura 368 y figura 369).

De esta forma, se puede conseguir la misma densidad de puntos con el doble de cobertura o, por el contrario, obtener el doble de densidad para valores convencionales de cobertura que lo conseguido con un LiDAR de pulso simple. Esto puede significar un ahorro de costes aproximado de un 50% (Roth & Thompson, 2008).

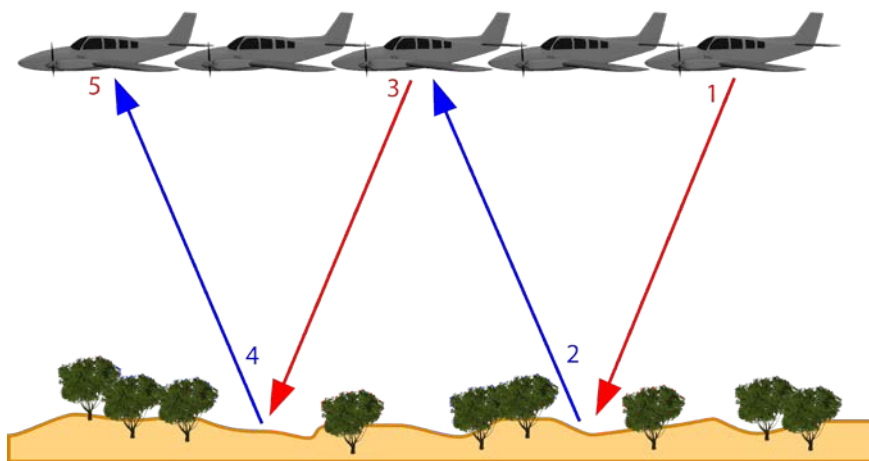


Figura 368: Frecuencia de recogida de información por un sensor de pulso simple.

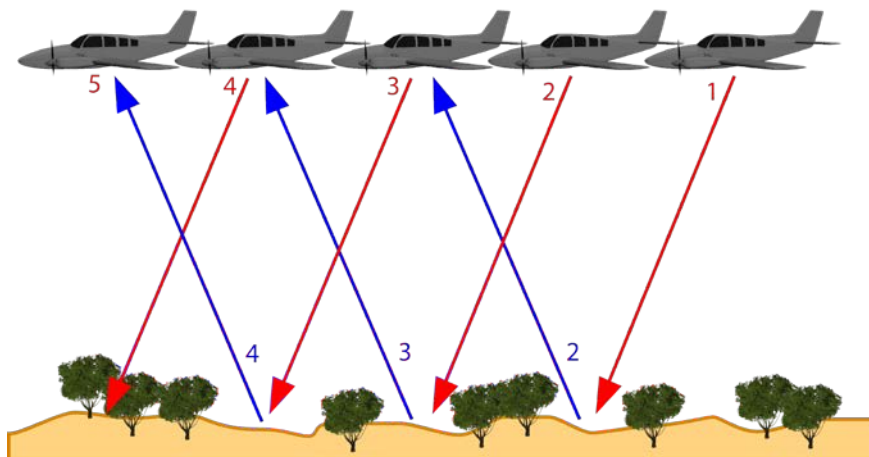


Figura 369: Frecuencia de puntos duplicada por un sensor de múltiples pulsos.

Debido a que se puede conseguir la misma densidad de puntos con una mayor cobertura, se puede reducir el FOV. Esto permite a los rayos entrar de mejor manera entre objetos con volumen ya que los rayos son más verticales, siendo útil en zonas urbanas o forestales. Por otro lado, como se puede aumentar la altura de vuelo, se minimizan los efectos del relieve del terreno sobre el ancho de barrido, requiriendo menor solape entre pasadas para asegurar la cobertura. Otros beneficios del aumento de la altura de vuelo sería la reducción de turbulencias haciendo el vuelo más confortable y menos fatigoso para los pilotos, pudiéndose planificar misiones de larga duración.

En la figura 370 se muestra una comparación de esta nueva tecnología con los sensores anteriores pudiéndose notar el aumento en la frecuencia máxima que puede alcanzar el sensor en función de la altura de vuelo.

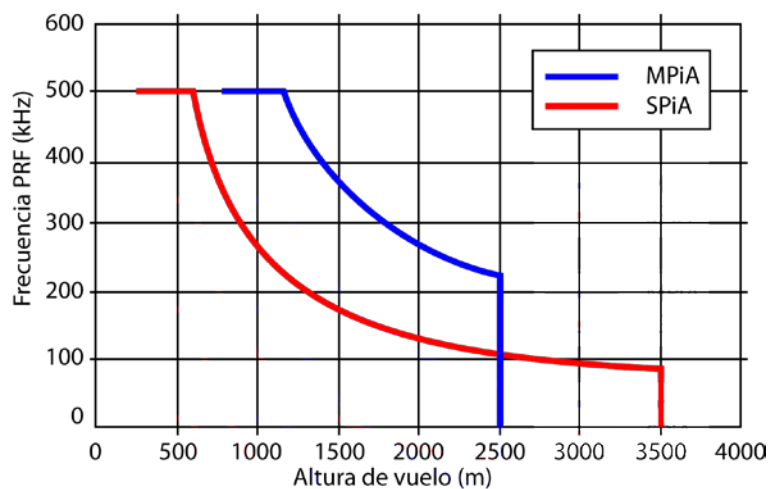


Figura 370: Comparación entre la relación de altura de vuelo y frecuencia PRF del sensor Leica ALS70-HP funcionando en modo SPiA y en modo MPiA (Leica, 2013).

Los fabricantes que incorporan esta tecnología a sus últimos modelos son Leica (a partir del modelo ALS50-II), Riegl, Optech o Fugro.

## A.8. Clases de láser

Existen hasta siete clases distintas de láser catalogadas por el estándar europeo UNE EN 60825-1/A2. Estas clases están definidas fundamentalmente por tres factores: longitud de onda, duración de la exposición y la potencia del haz. Hay que utilizar el láser con precaución y conocer perfectamente el riesgo potencial que conlleva. Por ello, todos los instrumentos deben estar etiquetados indicando la clase a la cual pertenecen.



Figura 371: Señal de advertencia de láser.

Las clases definidas en el estándar son:

- Clase 1: Son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso de instrumentos ópticos para visión directa. Utilizado por los escáneres Optech ILRIS, los de Riegl, Leica (ScanStation y HDS), Topcon, Trimble CX y Z+F Imager, así como los distanciómetros de las estaciones totales.
- Clase 1M: Son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero pueden ser peligrosos si se emplean lentes para visión directa. Operan entre 302.5 y 400 nm.
- Clase 2: Láseres que normalmente producen un reflejo ciego para proteger al ojo. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección en condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso de instrumentos ópticos con visión directa. Operan entre 400 y 700 nm. Podrían provocar daños oculares en exposiciones superiores a 0.25 segundos. Utilizado por los distanciómetros de mano (Leica Disto) o las plomadas cenit-nadir.
- Clase 2M: Láseres que normalmente producen un reflejo ciego para proteger al ojo. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección en condiciones de utilización razonablemente previsibles. Sin embargo, la visión de la salida del haz pueden ser peligrosa si el usuario emplea lentes. Operan entre 400 y 700 nm. Podrían provocar daños oculares en exposiciones superiores a 0.25 segundos.
- Clase 3R: Láseres potencialmente peligrosos cuando se produce visión directa, aunque el riesgo es menor que en el caso de láseres de la Clase 3B. Operan entre 106 y 302.5 nm. Podrían provocar daños oculares crónicos si se tiene contacto con el haz láser en exposiciones superiores a 0.25 segundos. Utilizado por los escáneres FARO Focus 3D, Trimble FX y Trimble TX5, así como algunos distanciómetros sin necesidad de prisma de las estaciones totales.
- Clase 3B: Láseres siempre peligrosos si existe exposición directa, aunque la visión de reflexiones difusas es normalmente segura. Generalmente, esta clase de láser no es adecuada en aplicaciones de campo. Podrían provocar daños oculares crónicos si se entra en contacto con el haz láser.

- Clase 4: Podrían provocar daños oculares o cutáneos agudos si se entra en contacto con el haz láser. Los láseres de esta clase también pueden producir reflexiones peligrosas. Esta clase de láser no es adecuada en aplicaciones de campo. Su utilización precisa extrema precaución. Pueden originar incendios. Utilizado por los sensores láser aéreos.





## Anexo B

# Especificaciones técnicas de dispositivos

## B.1. Sensores topográficos aerotransportados

En este apartado, se detallan algunas características de los últimos modelos en el mercado de las compañías más importantes en este sector (Petrie, 2011). La mayoría de las empresas presentan también modelos para bajas alturas o tareas específicas como los denominados “*Corridor*” para registro de estrechas franjas de terreno propio de obras lineales (carreteras, ferrocarriles, líneas eléctricas). Todos los sensores aquí detallados miden mediante “tiempo de vuelo por pulsos” y, debido a la altura de vuelo, el láser utilizado es de la clase 4, de gran potencia.

Tabla 38: Tabla resumen de los sensores LiDAR topográficos aerotransportados.

Sistema	Altura de vuelo (m)	Barrido (Hz)	PRF (kHz)	Full-waveform	Patrón de registro	FOV (grados)
Leica ALS70	200-5000	200	500	Sí	Sinusoidal	75
Optech ALTM Pegasus	300-2500	140	500	Sí	Zigzag	75
Riegl LMS-Q780	1000-5000	200	400	Sí	Líneas paralelas	60
Riegl VQ-580	200-2100	150	380	Sí	Líneas paralelas	60
Fugro FLI-MAP	80-1000	250	375	Sí	Líneas paralelas	60
TopEye Mk	< 1000	-	-	Sí	Helicoidal	50
AHAB Dragon Eye	-	-	300	Sí	Helicoidal	

En esta tabla, no aparecen los sistemas de IGI o Trimble porque utilizan sensores LiDAR de Riegl, por lo que las características son las mismas.

### B.1.1. Leica ALS70

Último modelo de la casa suiza que actualiza sus anteriores modelos: ALS40, ALS50 y ALS60. El sistema incorpora el escáner láser (LS70-LP) con tres posibles patrones de muestreo, sistema GNSS con soporte para GPS y GLONASS, sistema inercial propio (IPAS20), una cámara digital (1280 x 1024 píxeles) y controladores y software para el manejo de todo el equipo en vuelo y en post-proceso. Además, tiene la opción de incorporarle el módulo WDM65 para el registro “*full-waveform*” a 120 kHz. En esta familia de productos, Leica ofrece un producto para el registro de ciudades y franjas de terreno (ALS70-CM), uno para cartografía de propósito general (ALS70-HP) y uno para vuelos de grandes alturas (ALS70-HA). El Leica ALS70 utiliza un espejo oscilante en dos direcciones, presentándose los datos en forma sinusoidal. Su precio aproximado oscila entre 975000 € y 1135000 € (Leica, 2013).

Características técnicas:

- Altura de vuelo: Entre 200 y 5000 m.
- FOV: 0° a 75°.
- Puede alcanzar una frecuencia de barrido de 200 Hz (200 líneas por segundo).
- Emite pulsos láser a una frecuencia máxima de 500 kHz.
- Posibilidad de trabajar en MPiA o SPiA.
- Para un vuelo de menos de 3500 m altura y 40° de FOV, el sistema tiene una precisión lateral entre 5 y 38 cm y vertical entre 7 y 16 cm.
- Peso total (escáner y electrónica): 88 kg.



Figura 372: Leica ALS70.

### B.1.2. Optech ALTM Pegasus HD500

El modelo Pegasus es el último y más potente sensor de la familia ALTM que esta compañía canadiense ofrece. Existen otras opciones para alturas de vuelo (hasta 50 m y precisiones de 3 cm) y tamaños de proyectos menores como son los modelos Orion H, Orion M y Orion C. Estos modelos son más ligeros por lo que pueden equiparse en helicópteros. También ofrecen el modelo Gemini que permite volar con un mayor rango de alturas (150-4000 m) pero con frecuencias de barrido menores. Tanto el modelo Gemini como el Pegasus, llevan incorporada la tecnología CMP (*Continuos MultiPulse*) que permite emitir y recibir el doble de pulsos, tal y como se explica en el apartado A.7. Además, Pegasus tiene incorporada una cámara digital de 5 megapíxeles y tiene la posibilidad de montar una cámara digital de 60 megapíxeles. También tiene la opción de equiparse con un digitalizador “*full-waveform*”. Al igual que Leica, los LiDAR de Optech utilizan un espejo oscilante en dos direcciones, pero los datos se presentan en forma de zigzag (Optech, 2013).

Características técnicas:

- Altura de vuelo: Entre 300 y 2500 m.
- FOV: 0° a 75°.
- Puede alcanzar una frecuencia de barrido de 140 Hz (140 líneas por segundo).
- Emite pulsos láser a una frecuencia máxima de 500 kHz.
- Para una apertura FOV de 50°, el sistema tiene una precisión lateral de 1/5500 x altura en metros y vertical entre 5 y 15 cm.
- Sistema inercial Applanix POS AV AP50 y de posicionamiento GPS/GNSS/Galileo/Banda-L de doble frecuencia.
- Peso total (escáner y electrónica): 111 kg.



Figura 373: Optech ALTM Pegasus.

### B.1.3. Riegl LMS-Q780

Esta compañía austriaca construye y monta sus propios escáneres, pero también equipa a otras compañías de instrumentos geomáticos, por ejemplo, Trimble, IGI, iMAR, Tuck Mapping o LSI. De hecho, este sensor no lleva incorporado GNSS/INS. En octubre de 2012, Riegl ha presentado su nuevo modelo LMS-Q780 para vuelos a gran altura (entre 2000 y 3000 m), cuya potencia le permite medir 266 mil puntos por segundo a una altura de dos mil metros. Posee un sistema para procesar MTA (*Multi-Time-Around*), ya equipado en modelos anteriores, que le permite utilizar hasta ocho pulsos simultáneamente. Puede registrar a 400 kHz e infinitos ecos para “*full-waveform*”. Utiliza un espejo de polígono rotante unidireccional de cuatro caras, por lo que el patrón generado son líneas paralelas (Riegl, 2013). Características técnicas:

- Altura de vuelo: Entre 1000 y 5000 m.
- FOV: 0° a 60°.
- Longitud de onda: 1550 nm.
- Frecuencia de barrido (líneas/segundo) de 200 Hz.
- Frecuencia máxima de 400 kHz.
- Peso total (solo es un escáner): 20 kg. Con este peso y sus reducidas dimensiones permite ser instalado en aviones ligeros, helicópteros e incluso UAV.

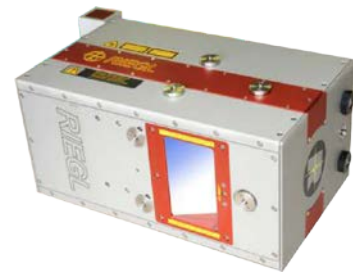


Figura 374: Riegl LMS-Q780.

### B.1.4. Riegl VQ-580

Como alternativa al modelo anterior, Riegl tiene el modelo VQ-580 para vuelos a media altura (entre 500 y 1500 m). Al igual que su hermano, tiene el mismo sistema de desvío del haz láser por lo que genera el mismo patrón de puntos. También posee un sistema para procesar MTA. Por sus características, está destinado a la instalación sobre helicópteros o UAV (Riegl, 2013). Características técnicas:

- Altura de vuelo: Entre 200 y 2100 m.
- Peso total (solo es un escáner): 13 kg.
- Puede alcanzar una frecuencia de barrido (líneas/segundo) de 150 Hz.
- Emite pulsos láser a una frecuencia máxima de 380 kHz.
- Longitud de onda: 1064 nm, especialmente diseñado para medición sobre nieve o hielo.



Figura 375: Riegl VQ-580.

### B.1.5. IGI LiteMapper 6800

Compañía alemana que monta un sistema de registro pero no fabrica el sensor LiDAR. En su lugar, monta sensores Riegl. El equipo más potente que tiene es el LiteMapper 6800 que viene equipado con el sensor Riegl LMS-Q680, modelo anterior al mencionado Riegl LMS-Q780 y de características similares: registro “*full-waveform*”, 400 kHz de frecuencia máxima, procesado de MTA, entre 1000 y 5000 m, etc. Posee el sistema propio de posicionamiento e inercial AEROcontrol.



Figura 376: IGI LiteMapper 6800.

Como opción, IGI ofrece la posibilidad de montar una cámara digital de medio formato DigiCAM y un sensor para termografía DigiTHERM, ambos propios de IGI. El peso total del equipo, incluyendo la electrónica y sin cámaras, es de 41 kg, por lo que se puede adaptar a helicópteros o aviones pequeños, como se muestra en las siguientes figuras:



Figura 377: IGI LiteMapper en Schweizer 333.



Figura 378: IGI LiteMapper en Eurocopter AS-350.



Figura 379: IGI LiteMapper en Bell 206.

Al igual que Optech, IGI ofrece otras dos soluciones más ligeras y de menor frecuencia para alturas de vuelo menores y registro de “corredores” (IGI, 2013).



### B.1.6. Trimble Harrier

Trimble también ofrece sensores LiDAR aéreos después de anexionar al grupo a la empresa alemana Toposys. Esta empresa fue famosa por su modelo Falcon basado en tecnología de fibra óptica. Actualmente y al igual que IGI, equipan sensores Riegl en la familia Harrier, con varios modelos en función del sensor Riegl que monten: Harrier 68i con Riegl LMS-Q680, Harrier 56 con Riegl LMS-Q560 y Harrier 48 con Riegl VQ-480 (Trimble, 2013).

El equipo más potente es el Harrier 68i que viene equipado con el sensor antecesor del mencionado Riegl LMS-Q780, por lo que tiene sus mismas características de registro láser. El sistema inercial y de posicionamiento es Applanix (perteneciente a Trimble) y tiene la posibilidad de integrar una cámara óptica digital de medio formato Rollei (también perteneciente a Trimble).

Los otros dos modelos son más ligeros y de menor frecuencia, destinados a proyectos de alturas de vuelo menores y “corredores”.



Figura 380: Antiguos TopoSys Falcon II y III.



Figura 381: Trimble Harrier 68i.

### B.1.7. Fugro FLI-MAP

Fugro es una compañía holandesa que en 1992 empezó a desarrollar su propio sensor láser. Actualmente, tiene un sistema montado sobre helicóptero y, al mismo tiempo, da servicio en proyectos para registro LiDAR.

El sistema que monta se denomina FLI-MAP y va equipado con dos receptores GNSS de Trimble y un sistema inercial Applanix. Lleva equipadas una cámara digital de 16 megapíxeles y dos cámaras de video. Además, lleva una cámara RGB de línea rígidamente acoplada al sensor láser para dotar de radiometría a los puntos registrados. Tiene posibilidad de registro mediante múltiples pulsos y utiliza espejo de polígono rotante, por lo que el patrón de salida está formado por líneas paralelas (Fugro, 2013).



Figura 382: Sensor LiDAR montado por Fugro FLI-MAP.

Características técnicas:

- Altura de vuelo: Entre 80 y 1000 m.
- FOV: 0° a 60°.
- Puede alcanzar una frecuencia de barrido de 250 Hz (250 líneas por segundo).
- Emite pulsos láser a una frecuencia máxima de 375 kHz.
- Precisión absoluta de los puntos: 3 cm.
- Con un vuelo bajo de 100 m y una velocidad baja de 35 nudos, podría alcanzar una densidad de 74 puntos por m<sup>2</sup>.

El sensor no se comercializa, siendo Fugro la que ofrece el servicio de recogida de datos.



Figura 383: Helicópteros de Fugro equipados con FLI-MAP.

### B.1.8. Otros sensores

De menor éxito comercial son otras compañías que montan sistemas basados en los sensores de otros fabricantes. Algunos de estos sistemas son:

- iMAR 3D-ALS (Alemania) con sensor Riegl, GNSS de Javad, sistema inercial propio de iMAR y cámara óptica Rollei AIC.
- Tuck Mapping EagleEye (EE.UU.) con sensor Riegl, sistema inercial Applanix y cámara óptica Trimble DSS.
- TopEye Mk (Suecia) con sensores láser propios para vuelos a baja altura. Tienen dos modelos: uno con espejo oscilante en dos direcciones y otro con espejo oscilante Palmer Scan. Esta empresa pertenece actualmente al grupo Blom.
- AHAB Dragon Eye (Suecia) con sensor láser propio de espejo oscilante Palmer Scan. Es ligero y compacto, con registro mediante múltiples pulsos, frecuencia máxima 300 kHz y posibilidad de “*full-waveform*”.
- LSI Helix (Canadá) con sensor Riegl.

## B.2. Sensores batimétricos

También existe la posibilidad de registrar el fondo marino, hasta una determinada profundidad, utilizando sensores LiDAR. Para ello, los sistemas utilizan dos sensores operando simultáneamente con dos longitudes de onda diferentes: infrarrojo (1064 nm) para la superficie del agua y verde (532 nm) para el fondo marino. La diferencia de tiempo en la llegada del pulso recibido proporcionará los valores de profundidad.

Las aplicaciones de los sensores LiDAR batimétricos son el cartografiado y gestión de zonas de costa, puertos, lagos y canales navegables, monitorización de la erosión de playas y costas, realización de cartografía náutica, gestión de ecosistemas acuáticos, arqueología o detección de objetos sumergidos, etc.

Algunos sensores comerciales que permiten operar en estos entornos son los siguientes.

### B.2.1. Optech CZMIL

Optech ofrece dos sistemas para la medición de terrenos sumergidos. El modelo CZMIL es el más importante y ha visto la luz en el año 2012 con ayuda del gobierno de EE.UU. Es la actualización del anterior modelo SHOALS (*Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey System*). Ofrece de manera simultánea imágenes e información 3D de la costa y de zonas sumergidas poco profundas y turbias, hasta 50 m de profundidad. De hecho, combina un LiDAR batimétrico con una cámara óptica digital de 16 megapíxeles y un sistema de imágenes multiespectral. Para gestionar y fusionar la información de los tres sensores, Optech ofrece el software HydroFusion (Optech, 2013).

Características técnicas:

- Altura de vuelo: Entre 200 y 400 m.
- FOV: fijo a 20°.
- Emite pulsos láser a una frecuencia máxima de 10 kHz para el LiDAR batimétrico y 70 kHz para el topográfico.
- Precisión en la medida de la profundidad:  $[0.3^2 + (0.013 \times \text{profundidad})^2]^{1/2}$  m.
- Precisión horizontal del fondo acuático:  $(3.5 + 0.05 \times \text{profundidad})$  m.
- Máxima profundidad: Hasta 3 veces la profundidad de Secchi.



Figura 384: Optech CZMIL.

### B.2.2. Optech ALTM Aquarius

Este sensor, pensado como un accesorio del modelo Gemini, registra simultáneamente mediciones de tierras emergidas y tierras sumergidas poco profundas (hasta 10 m) y claras, permitiendo generar un conjunto con todos los datos independientemente del origen. Las características del sensor topográfico son las mismas que las del modelo Gemini (o Pegasus).

Para el sensor batimétrico, la altura de vuelo está entre 300 y 600 m. El FOV tiene una apertura máxima de 25° y emite pulsos láser a una frecuencia máxima de 70 kHz (Optech, 2013).

### B.2.3. Riegl VQ-820-G

El sensor ofrecido por Riegl tiene las mismas propiedades que un láser topográfico más un láser de longitud de onda de 532 nm para medir bajo el agua. Por tanto, ofrece la posibilidad de procesar “*waveform*” con frecuencias de 520 kHz (Riegl, 2013).

Características técnicas:

- Altura de vuelo sugerida para zonas emergidas de 1800 m y 600 m para tierras sumergidas.
- Hasta una profundidad de Secchi.
- FOV: 0 a 60°.
- Puede alcanzar una frecuencia de barrido de 200 Hz (200 líneas por segundo).

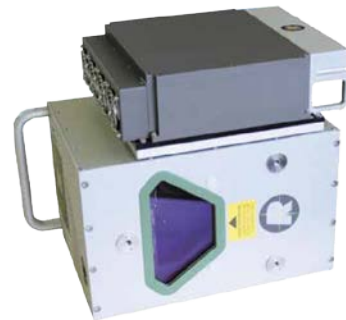


Figura 385: Riegl VQ-820-G.

### B.2.4. AHAB HawkEye II

Modelo batimétrico de la compañía sueca Airborne Hydrography AB. Tiene la posibilidad de medir “*full-waveform*”. La profundidad máxima que puede alcanzar es de tres profundidades Secchi (70 m teóricos), con una precisión en el fondo acuático de 25 cm vertical y 2.5 m horizontal. Lleva incorporada una cámara digital de dos megapíxeles, opcional de 16 megapíxeles. Emite pulsos láser a una frecuencia máxima de 4 kHz para el LiDAR batimétrico y 64 kHz para el topográfico.



Figura 386: AHAB HawkEye II.

Pronto tendrán en el mercado otro modelo para aguas poco profundas de menos de 10 m, denominado Chiroptera (AHAB, 2013).

### B.3. Sensores terrestres

En este apartado, se detallan algunos de los sensores LiDAR terrestres más conocidos. Algunos de ellos son 2D, útiles para ser instalados en sistemas MMS. Se diferencian entre sensores de medición por pulso, de medición por desviación de fase y de medición por triangulación. Aunque existe una amplia variedad de modelos, según los principios teóricos se podría considerar que los escáneres de triangulación tienen un alcance de unos pocos metros y precisión inferior al milímetro, los escáneres de medición por fase llegan hasta los 200 m con precisión milimétrica y los escáneres de medición por pulso pueden medir hasta centenares de metros con precisión centimétrica.

Tabla 39: Tabla resumen de los sensores LiDAR terrestres.

Sistema	Tipo	Distancia (m)	Velocidad (10 <sup>3</sup> pts/seg)	Resolución Hz/V (grad)	Precisión (mm)	Cámara (Mpíxel)	Peso (kg)
Riegl VZ-6000	Pulso	5800	222	0.0020	15	5	15
Riegl VZ-400	Pulso	200	122	0.0024	5	-	-
Leica ScanStation P20	Pulso	120	1000	0.0022	3 a 50 m 6 a 100 m	5	15
Optech ILRIS	Pulso	3000	10	0.0045	7 a 100 m	3.1	14
Topcon GLS-1500	Pulso	330	30	0.0017	4 a 150 m	2	16
Trimble CX	Pulso	80	54	0.0040 / 0.0068	7 a 50 m	-	12
Leica HDS 7000	Fase	187	1000	0.0004	3 a 50 m 10 a 100 m	-	12
FARO Focus 3D	Fase	120	1000	0.0090	5 a 50 m	70	5
Trimble FX	Fase	140	216	0.0022	2 a 50 m	-	12
Trimble TX5	Fase	120	1000	-	2 a 25 m	70	5
Z+F Imager 5010C	Fase	190	1000	0.0002 / 0.0004	3 a 50 m 10 a 100 m	80	12

Tabla 40: Tabla resumen de los sensores LiDAR terrestres 2D.

Sistema	Distancia (m)	Velocidad (10 <sup>3</sup> pts/seg)	Resolución Hz/V (grad)	Precisión (mm)	Peso (kg)
Riegl VQ-450	800	550	0.001	5 a 50 m	12.5
Riegl VQ-250	500	300	0.001	5 a 50 m	11
SICK LMS511	80	75	0.25	14 a 20 m	3.7
Velodyne HDL-64E	120	1333	0.09	20	13
Velodyne HDL-32E	70	700	0.16	20 a 25 m	2



### B.3.1. Medición por Pulso

#### B.3.1.1. Riegl Serie VZ

La marca austriaca ofrece un abanico de cuatro posibilidades (VZ-6000, VZ-4000, VZ-1000 y VZ-400) en función de las necesidades de cada proyecto: precisiones, distancias máximas y mínimas, velocidad, etc. Todos ellos con antena GNSS integrada y procesado “*waveform*” para múltiples ecos.

Es destacable el modelo VZ-6000 con una distancia máxima de medición de 5800 m y una precisión de 15 mm en los puntos. Además, lleva incorporada una cámara óptica de 5 megapíxeles y tiene una velocidad de registro de 222 mil puntos por segundo. La resolución angular es de 0.002°. Tiene un peso aproximado de 15 kg. Láser de clase 3B.



Figura 387: Riegl VZ-6000.



Figura 388: Riegl VZ-400 con cámara Nikon.

En el lado opuesto, se ofrece el modelo VZ-400 con una distancia máxima de medición de 200 m, una precisión 5 mm y la posibilidad de integración de cámara óptica digital de 12 megapíxeles. Tiene una velocidad de registro de 122 mil puntos por segundo. La resolución angular es de 0.0024°. Láser de clase 1 (Riegl, 2013).

#### B.3.1.2. Riegl Serie VQ

Los modelos VQ-450 y VQ-250 son sensores láser 2D útiles para montaje en sistemas MMS. De hecho, son muy utilizados y montados en soluciones de compañías como Trimble, IGI, además de la propia Riegl. El nuevo modelo VQ-450 (septiembre 2012) registra a una velocidad de 550 kHz, 200 líneas por segundo hasta una distancia máxima de 800 m y en los 360°. Tiene una precisión de 5 mm a 50 m y pesa, aproximadamente, 12 kg. Las prestaciones del modelo VQ-250 son ligeramente inferiores (Riegl, 2013).



Figura 389: Riegl VQ-450.



### B.3.1.3. Leica ScanStation P20

Escáner de Leica de reciente aparición (Noviembre 2012) que mejora en prestaciones a su antecesor C10. Permite medir hasta 120 m con una velocidad de un millón de puntos por segundo. La precisión en la medida 3D es de 3 mm a 50 m y 6 mm a 100 m. Lleva incorporada una cámara digital de 5 megapíxeles y permite el procesamiento “*waveform*”. La resolución angular es de 8”. Tiene un peso aproximado de 15 kg. La longitud de onda con la que trabaja es de 808 nm. Láser de clase 1. Tiene un precio aproximado de 85 mil euros (Leica, 2013).



Figura 390: Leica ScanStation P20.

### B.3.1.4. Optech ILRIS

Optech ofrece varios modelos dentro de la familia ILRIS para el registro terrestre mediante LiDAR. Miden a una distancia mínima de 3 m y máxima (según modelo) de 3000 m. La frecuencia máxima de registro es de 10 kHz. Tienen una precisión de medida de la distancia a 100 m de 7 mm y una precisión en ángulos de 0.0045°.

Llevan una cámara óptica integrada de 3.1 megapíxeles, posibilidad de incluir antena GNSS y un peso aproximado de 14 kg. Según el modelo, la clase de láser es 1 ó 3 (Optech, 2013).



Figura 391: Optech ILRIS.

### B.3.1.5. Topcon GLS-1500

Opción ofrecida por la compañía japonesa que tiene un rango de medida de distancias de 1 m a 330 m. Tienen una precisión de medida de la distancia a 150 m de 4 mm y una precisión en ángulos de 6”.

La velocidad en el registro es de 30 mil puntos por segundo. Lleva incorporada una cámara de dos megapíxeles. El peso aproximado es de 16 kg y un precio orientativo de 60 mil euros (Topcon, 2013). Láser de la clase 1.



Figura 392: Topcon GLS-1500.

### B.3.1.6. Trimble CX 3D Scanner

Modelo de Trimble de tecnología WAVEPULSE que combina medición por tiempo de vuelo con medición por fase. Permite trabajar desde 0.5 m hasta una distancia máxima de 80 m con una velocidad de 54 mil puntos por segundo. Se puede obtener una desviación estándar en la medida a 50 m de 7.3 mm. La precisión en la medida de ángulos horizontales es de  $0.004^\circ$  y verticales de  $0.0068^\circ$ . La longitud de onda es de 660 nm. El peso aproximado es de 12 kg y un precio orientativo de 80 mil euros (Trimble, 2013). Láser de la clase 1 y 3.



Figura 393: Trimble CX 3D Scanner.

### B.3.1.7. SICK LMS511

Esta compañía alemana ofrece varios modelos para la medición mediante láser. No todos ellos son útiles para el registro con fines cartográficos pero tienen un modelo 2D que se utiliza en varios sistemas móviles.

El modelo LMS511 es un modelo TOF con un espejo giratorio que tiene una distancia máxima de medición de 80 m y su precisión es de 14 mm a 20 m. Es la actualización del modelo LMS291 utilizado por diversas compañías en sus MMS, como Topcon o Mitsubishi. Apenas pesa 3.7 kg y tiene un coste, aproximadamente, de 5000 € (SICK, 2013).



Figura 394: SICK LMS511.

### B.3.1.8. Velodyne HDL

La familia de escáneres láser HDL son láseres TOF de alta definición 2D, que se instalan en varios sistemas MMS. Se ofrecen dos productos: HDL-64E y HDL-32E. El primero ofrece velocidades de 1.33 millones de puntos por segundo a una distancia máxima de 120 m. Su resolución angular es de  $0.09^\circ$  y la precisión en la medida de la distancia inferior a 2 cm. El segundo registra 700 mil puntos por segundo a una distancia máxima de 70 m. Su resolución angular es de  $0.16^\circ$  y la precisión en la medida de la distancia es de 2 cm a 25 m.

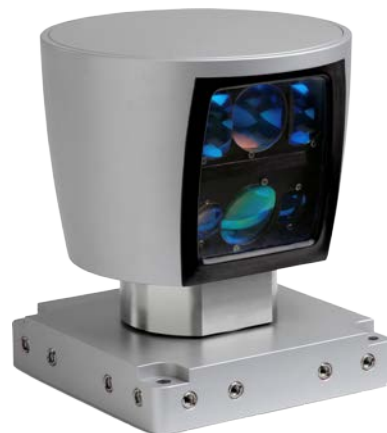


Figura 395: Velodyne HDL-64E.

Una de las características principales del modelo HDL-64E es la batería de 64 unidades individuales de láser que tiene colocadas en determinados ángulos fijos para ofrecer un ángulo de  $26.8^\circ$  en el plano vertical, eliminando así la necesidad de movimiento angular vertical, utilizado normalmente en los equipos terrestres (figura 396). De la misma manera, el modelo HDL32E tiene 32 sensores.

El precio del modelo HDL-64E ronda los 55 mil euros (Velodyne Lidar, 2013).

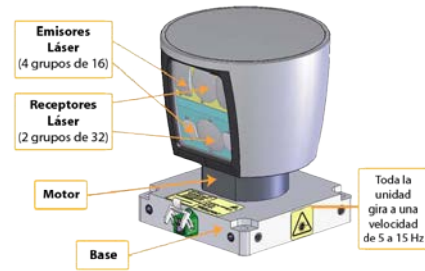


Figura 396: Montaje del Velodyne HDL-64E.

### B.3.2. Medición por Desviación de Fase

#### B.3.2.1. Leica HDS 7000

Modelo de fase de Leica. Permite medir hasta 187 m con una velocidad de más de un millón de puntos por segundo. El ruido en la medida es de 3 mm a 50 m y 10 mm a 100 m.

La precisión angular es de  $0.007^\circ$  y la resolución angular es de  $0.0004^\circ$ . Tiene un peso aproximado de 12 kg y un precio orientativo de 90 mil euros (Leica, 2013). Láser de clase 1.



Figura 397: Leica HDS 7000.

#### B.3.2.2. FARO Laser Scanner Focus 3D

La empresa americana FARO ofrece el modelo Focus 3D de tamaño muy compacto y peso reducido (apenas 5 kg). Tiene incorporada una cámara de 70 megapíxeles.

El alcance máximo es de 120 m, con una velocidad máxima de registro de casi un millón de puntos por segundo. La resolución angular es de  $0.009^\circ$ . El ruido en la medida es de 5 mm a 50 m. Láser de clase 3R. Tiene un precio aproximado de 35 mil euros (FARO, 2013).



Figura 398: FARO Laser Scanner Focus 3D.

### B.3.2.3. Trimble FX 3D Scanner

Modelo de fase de Trimble. Permite medir hasta 140 m con una velocidad de 216 mil puntos por segundo. Tiene una precisión en la medida de 2 mm a 50 m.

La precisión angular es de  $0.005^\circ$  y la resolución angular es de  $0.0022^\circ$ . La longitud de onda es de 685 nm. Tiene un peso aproximado de 12 kg y un precio orientativo de 110 mil euros (Trimble, 2013). Láser de clase 3R.



Figura 399: Trimble FX 3D Scanner.

### B.3.2.4. Trimble TX5

La empresa canadiense acaba de sacar al mercado este modelo, basado en desviación de fase, compacto y ligero, ya que pesa sólo 5 kg. Además, está equipado con una cámara de 70 megapíxeles.

Tiene una velocidad de registro de casi un millón de puntos por segundo y permite medir distancias entre 0.6 m y 120 m. Tiene una precisión en la medida de 2 mm a 25 m. La longitud de onda es de 905 nm. Láser de clase 3R. El precio es, aproximadamente, de 40 mil euros (Trimble, 2013).



Figura 400: Trimble TX5.

### B.3.2.5. Z+F Imager 5010C

La empresa alemana Zoller + Fröhlich GmbH ofrece este sensor basado en desviación de fase con una cámara incorporada de 80 megapíxeles.

Tiene una velocidad de registro de más un millón de puntos por segundo y distancia máxima de registro de casi 190 m. El ruido en la medida es de 3 mm a 50 m y 10 mm a 100 m. La precisión angular es de  $0.007^\circ$  y la resolución angular es de  $0.0004^\circ$  para ángulos verticales y  $0.0002^\circ$  para ángulos horizontales. Tiene un peso aproximado de 12 kg. Láser de clase 1 (Z+F, 2013).



Figura 401: Z+F Imager 5010C.

### B.3.3. Medición por Triangulación

#### B.3.3.1. NextEngine 3D Scanner HD

La empresa americana NextEngine ofrece tres modelos de escáner de triangulación que se diferencian básicamente en los algoritmos utilizados en post-proceso para tratar la nube de puntos registrada. Utilizan una fuente de luz de 650 nm y una cámara de tres megapíxeles. Tiene dos modos de trabajo: en el primero, el objeto no puede exceder de 12 cm y obtienen una densidad de 25 mil puntos por  $\text{cm}^2$ ; en el segundo, el objeto puede ser hasta 34 cm con una densidad de 3500 puntos por  $\text{cm}^2$ . El tiempo de adquisición es de dos minutos.

El coste de este dispositivo es inferior a 2500 €. También ofrecen software para el tratamiento (NextEngine, 2013).



Figura 402: NextEngine 3D Scanner HD.

#### B.3.3.2. Nub3D SIDIOPro



Figura 403: Nub3D SIDIOPro.

La empresa española Nub3D también ofrece tres modelos basados en registro por triangulación por luz blanca estructurada. La base de todos ellos es una cámara de 1.4 megapíxeles que puede trabajar a una distancia entre 33 y 120 cm, registrando puntos con una separación de hasta 0.11 mm en tan sólo 1.5 segundos. La precisión de registro puede llegar a 9  $\mu\text{m}$ . El peso es de 7.8 kg (NUB3D, 2013).

#### B.3.3.3. Breuckmann

Esta empresa alemana ofrece varios productos destinados, mayormente, a la metrología industrial, pero también para el modelado anatómico. De hecho, los dispositivos suelen acoplarse sobre brazos robotizados para escanear la pieza u objeto, aunque también puede ajustarse sobre trípode. Como diferencia respecto de otros dispositivos, ofrecen uno con dos cámaras aumentando con ello la precisión de los puntos medidos (Breuckmann, 2013).



Figura 404: Breuckmann stereoSCAN 3D.



#### B.3.3.4. Mantis Vision F5

Escáner de luz estructurada de corta distancia que trabaja en cualquier condición de luz por lo que puede trabajar en interiores y exteriores. Es ligero (1.7 kg) y fácil de usar, no siendo necesario incluir puntos de control entre escenas. Recoge 50 mil puntos en cada imagen, a una velocidad de 10 FPS. Puede alcanzar una precisión de 0.5 mm a 100 cm de distancia. La distancia máxima de registro es de 4.5 m y mínima de 0.5 m. El precio de este dispositivo es inferior a 50 mil euros. Existe otro modelo (F5 SR) cuya distancia máxima son 80 cm y mínima de 30 cm, pero con una precisión máxima de 0.05 mm. Recoge hasta 500 mil puntos por segundo y apenas pesa 500 g (Mantis Vision, 2013).



Figura 405: Mantis Vision F5.



Figura 406: Mantis Vision F5 SR.

#### B.3.3.5. Konica Minolta Vivid 9i

Escáner basado en triangulación que utiliza la luz estructurada como línea, escaneando todo el objeto con ayuda de un espejo rotatorio y capturando la imagen con una cámara CCD de 1.3 megapíxeles. Puede escanear un objeto en menos de tres segundos generando una malla de cientos de miles de puntos, además de una imagen RGB. Las distancias de registro oscilan entre 0.5 m y 2.5 m con una precisión de 0.05 mm. Utiliza un láser de clase 2. Su precio es inferior a 45 mil euros (Konica Minolta, 2013).

Minolta también ofrece el modelo Range 7, basado en triangulación, con precisiones de 4  $\mu$ m.



Figura 407: Konica Minolta Vivid 9i.



## B.4. Sistemas móviles

Aunque, inicialmente, los sistemas MMS fueron montados por las empresas que proporcionaban los servicios, hoy en día, existe un buen número de sistemas integrales proporcionados por los constructores de los dispositivos. Estas empresas tienen larga experiencia porque pertenecen al campo de la Cartografía y la Fotogrametría, como pueden ser Topcon, Trimble, Optech, Riegl o Leica.

### B.4.1. 3D Laser Mapping - IGI

Esta empresa británica ofrece varios productos basados en sistemas láser, desde sistemas móviles a sistemas láser de mano. En colaboración con la compañía alemana IGI, ofrecen un sistema MMS denominado StreetMapper. Al igual que el dispositivo aéreo ofrecido por IGI, este modelo también equipa sensores Riegl, modelo VQ-250. El IMU es el IGI TERRAcontrol. Tanto el receptor GNSS como las cámaras fotográficas o de video pueden ser de cualquier fabricante. El software utilizado para el control del sistema inercial y para el tratamiento de los datos es de IGI. El procesamiento final lo realizan con software de TerraSolid. Basado en este modelo, IGI ofrece una variante para registro de vía férrea y todos sus accesorios denominado RailMapper.



Figura 408: Escáner móvil de mano ZEB1.

Por otro lado, acaban de sacar al mercado un MMS de mano, que permite el registro de interiores, incluso donde no llega el GNSS. Consiste en un dispositivo ligero (700 g) que se lleva en la mano, oscilándolo mientras se avanza a pie por la escena. El dispositivo lleva un sistema inercial en su interior y va registrando puntos mediante perfiles en el movimiento oscilatorio. Mide más de 40 mil puntos por segundo, con una precisión de 3 cm a una distancia máxima de 30 m (3D Laser Mapping, 2013).



Figura 409: Vehículo equipado con StreetMapper y foto de detalle donde se distingue el sensor de Riegl.

### B.4.2. Topcon IP-S2

Topcon tiene el sistema IP-S2 para MMS. La distancia máxima de registro es de 80 m, con una precisión máxima de 45 mm. El sistema incluye un receptor GNSS Topcon de

doble frecuencia capaz de trabajar a 20 Hz, junto con una unidad IMU Honeywell HG1700 basada en RLG que opera a 100 Hz y complementado con un odómetro que trabaja a 30 Hz. La unidad de registro de imagen es el modelo Ladybug3 de Point Grey Research que genera una imagen panorámica de 360° con velocidades de hasta 15 FPS.

El escaneado láser se lleva a cabo utilizando tres escáneres SICK LMS 291 a 75 Hz. Uno de estos escáneres láser apunta hacia atrás en dirección a la carretera, mientras que los otros dos escáneres se sitúan a cada lado para obtener una serie continua de los perfiles en el plano vertical.

En las siguientes imágenes, se puede apreciar la unidad de control de color amarillo en la parte inferior y, a ambos lados, los escáneres láser SICK LMS 291 de color blanco. Sobre la unidad de control está la unidad IMU, también de color amarillo. A continuación, están las cámaras Ladybug3; y, por último, el receptor GNSS de Topcon.



Figura 410: Sistema Topcon IP-S2 montado sobre un automóvil y vista de detalle.

Actualmente, Topcon también ofrece el modelo IP-S2 HD que incluye un láser escáner del alta definición (Velodyne HDL-64E) que permite registrar 1.33 millones de puntos por segundo, a una distancia máxima de 120 m y con 20 mm de precisión. El sistema completo tiene un coste aproximado de 280 mil euros (Topcon, 2013).

### B.4.3. Mitsubishi MMS

Mitsubishi ofrece un gran abanico de posibilidades para su MMS con siete configuraciones diferentes. Están agrupados en dos familias: MMS-S y MMS-X. La versión más básica, MMS-S, se ofrece con hasta dos cámaras de vídeo y dos escáneres láser instalados en la parte delantera del vehículo. La resolución de las cámaras es de 2 megapíxeles. La versión avanzada, MMS-X, se ofrece con hasta seis cámaras y hasta cuatro escáneres láser. La resolución de las cámaras es de 5 megapíxeles. En todos los modelos, los escáneres láser montados son SICK LMS 291, los receptores GNSS son de Trimble y el IMU FOG de Ballesta. El sistema asegura 10 cm de precisión absoluta en los puntos a 7 m de distancia. Además, se ofrece un modelo (MMS-X 320R) equipado con un láser Riegl

VQ-250 de largo alcance (200 m) y gran densidad (hasta 300 mil puntos por segundo). El sistema asegura 10 cm de precisión absoluta en los puntos a 80 m de distancia.

En la siguiente figura, se puede apreciar en detalle la configuración más avanzada del sistema (MMS-X 640) con seis cámaras y cuatro escáneres láser. Las cámaras son los elementos numerados del 1 al 6. Los escáneres láser son los elementos numerados del 7 al 10. La antena GNSS es el elemento numerado con el 11 y el sistema inercial es el número 12. En la rueda, se encuentra el odómetro con el número 13 (Mitsubishi Electric, 2013).

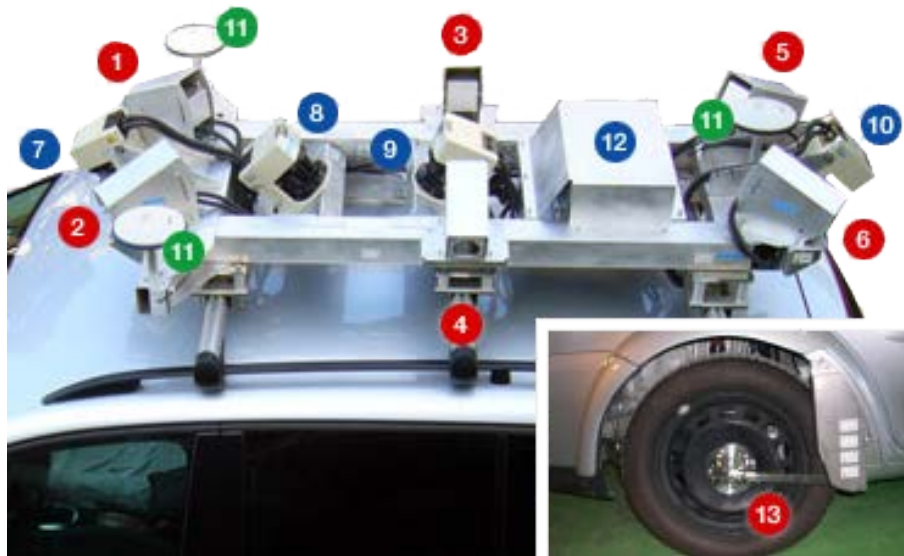


Figura 411: Configuración del MMS de Mitsubishi.

#### B.4.4. Trimble MX

La compañía canadiense ofrece varias opciones hardware y software para MMS en función de las necesidades de cada proyecto. En cuanto al hardware, ofrece tres opciones diferentes: MX1, MX3 y MX8. Estos modelos están especialmente diseñados para ingenieros y topógrafos para el modelado, inventariado, inspección y mantenimiento de carreteras, vías férreas y toda las infraestructuras que les rodean. El modelo MX8 es el más avanzado y está equipado con dos escáneres láser 2D Riegl VQ-250 y dos cámaras delante (panorámica y oblicua) de alta frecuencia (15 y 5 megapíxeles, respectivamente). Opcionalmente, puede llevar otras dos cámaras detrás. El sistema de posicionamiento es el Applanix POS LV 420 de Trimble y la antena GNSS igualmente es de Trimble, garantizando 10 mm de precisión en el registro. El modelo MX3 es más económico y está diseñado para el registro en “corredores”. Sus componentes son de peor calidad, garantizando una precisión de 35 mm. Y el modelo MX1 es el más sencillo y está destinado al registro fotogramétrico en general. El modelo MX8 tiene un precio aproximado de medio millón de euros (Trimble, 2013).

En cuanto al software, Trimble ofrece Trident Analyst con cuatro niveles diferentes. El nivel más completo ofrece la extracción y procesamiento de datos, incluyendo la

detección semiautomática, reconocimiento y extracción de objetos tales como señales de tráfico o señalización horizontal, cálculo de perfiles y cubicaciones o medida 3D de puntos.

Por otro lado, Trimble también ofrece otra opción para el registro de interiores por medio del carrito TIMMS equipado con dos LiDAR 2D, IMU y una cámara esférica Ladybug3 de 2 megapíxeles. Se asegura una precisión de 35 mm en la medida de puntos. Pesa 56 kg.



Figura 412: Trimble MX8 montado sobre automóvil.



Figura 414: Vista frontal del Trimble MX8.



Figura 413: Trimble TIMMS para interiores.

#### B.4.5. Optech LYNX

Optech ofrece el sistema LYNX Mobile Mapper con dos posibles configuraciones (V200 y M1). Según el modelo, puede incluir hasta dos escáneres láser 2D y hasta cuatro cámaras digitales de área. También incluye una unidad IMU Applanix POS.LV.420 con receptor GNSS de doble frecuencia y un instrumento de medida de distancia DMI. Los escáneres láser tienen un alcance de 200 m, una cobertura angular de 360°, un PRF de hasta 500 kHz y una velocidad de barrido programable de 200 Hz. Optech proporciona el software LYNX Survey y Optech LMS para el post-proceso de los datos medidos (Optech, 2013).





Figura 415: Optech LYNX Mobile Mapper sobre vehículo.

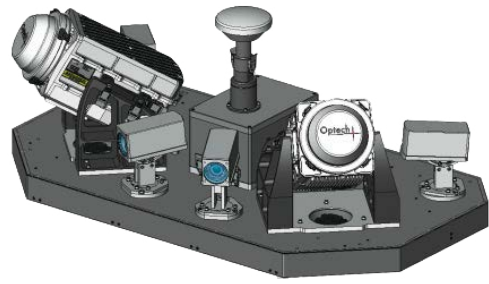


Figura 416: Optech LYNX Mobile Mapper sin carcasa.

#### B.4.6. Leica Pegasus SM 70

El equipo de Leica tiene seis cámaras calibradas con fines fotogramétricos, basadas en sensores de área de 1600x1200 píxeles y de posición configurable por el usuario. El sistema de posicionamiento inercial está basado en el Novatel SPAN. El láser es un Leica HDS 7000, montado con una inclinación de 40° y 14° de cabeceo para definir de mejor manera los bordes y dos de las fachadas de las edificaciones. El software, incluido como módulo de ArcGIS, permite capturar elementos estereoscópicamente, visualizando la nube de puntos LiDAR en 3D.

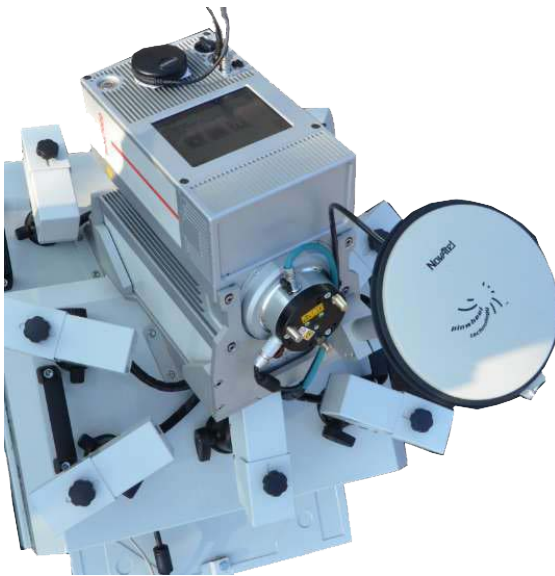


Figura 417: Detalle de la configuración del Leica Pegasus y montaje sobre automóvil.

El coste del sistema de Leica depende de los componentes, pero tiene un precio aproximado de 350 mil euros (Leica, 2013).

#### B.4.7. Riegl VMX

Además de construir escáneres láser para otros fabricantes LiDAR, Riegl ofrece dos sistemas MMS: VMX-250 y VMX-450. El modelo más avanzado es el VMX-450 que equipa dos escáneres 2D Riegl VQ-450, permitiendo registrar más de un millón de puntos por segundo con procesamiento “*full-waveform*” incluido, con una velocidad de 200 Hz. A la máxima velocidad, alcanza hasta 220 m y una precisión relativa de 8 mm. El modelo VMX-250 es más lento y de menor alcance y precisión. Opcionalmente, ambos pueden llevar equipadas hasta seis cámaras de cinco megapíxeles. Riegl también ofrece su propio software para el tratamiento de la información recogida (Riegl, 2013).



Figura 418: Riegl VMX-450.

#### B.4.8. Siteco Road-Scanner

La compañía italiana Siteco ofrece la tercera generación de este sistema MMS configurable, que monta hasta tres escáneres láser FARO Focus 3D y hasta ocho cámaras de alta resolución, dos de ellas en la parte delantera permitiendo estereoscopia. Está equipado con una antena GNSS Trimble Zephyr y puede equipar IMU de varias marcas (Applanix POS LV o IXBLUE LANDINS). Gracias a los escáneres de FARO, asegura una precisión de 2 mm a 120 m. Siteco también ofrece software para el procesamiento de la información: Road-SIT Survey (Siteco, 2013).

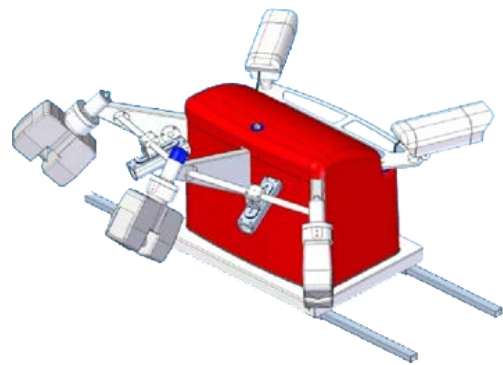


Figura 419: Siteco Road-Scanner3.

#### B.4.9. MDL Dynascan

Esta empresa inglesa tiene varios sistemas de bajo coste y reducidas dimensiones para ser transportados como MMS. Pueden ser instalados sobre un coche, *quad* o barco en función de la zona que se desee registrar, ya que pesan menos de 25 kg. Su modelo más avanzado es el HD100 que equipa un láser FARO Focus 3D, por lo que aseguran 2 mm a 120 m (MDL, 2013).



Figura 420: MDL Dynascan HD100.



## B.5. Sistemas inerciales

Las Unidades de Medida Inercial o IMU cumplen una importante misión en el registro aerotransportado y móvil de puntos mediante láser e, incluso, de imágenes. Hay un gran número de dispositivos de IMU que pueden generar un flujo continuo de datos de posición y orientación cuando las señales GNSS por satélite no están disponibles (Zupt, LLC, 2012). Es por ello, que se va a realizar una mención a breves detalles técnicos de sus características y a algunos modelos comerciales.

Existen cuatro tipos de tecnologías empleadas para la medición de la velocidad angular disponibles para ser utilizados en IMU aerotransportados o integrados en sistemas MMS (Barbour, 2011):

- MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*): Son giróscopos que utilizan pequeños diapasones de cuarzo como sensores integrados en chips de silicio. Se utilizan en sistemas de imagen de bajo coste y en aplicaciones menos exigentes en cuanto a precisión se refiere. No son utilizados en LiDAR aerotransportado, pero cada vez más utilizados en MMS.
- FOG (*Fiber-Optic Gyros*): Giróscopos ópticos de mayor precisión que los anteriores y muy utilizados. Emplean largas fibras ópticas enrolladas. Obviamente, más caros.
- RLG (*Ring Laser Gyros*): Son los de mayor precisión, pero también los más caros, llegando incluso a 150 mil euros. Son ópticos y sólo utilizados por sistemas de imagen y LiDAR de alta precisión.
- DTG (*Dynamically Tuned Gyros* o *Dry Tuned Gyros*): Giróscopo electro-mecánico de prestaciones similares a los RLG, pero muy frágiles y con necesidad de mantenimiento. Son poco utilizados (Barbour & Schmidt, 1998).

A continuación, se detallan brevemente los modelos más conocidos. La mayoría de ellos ofrece una versión aerotransportada y otra para MMS.

### B.5.1. IGI AEROcontrol

El IMU de IGI se denomina AEROcontrol para proyectos aéreos y TERRAcontrol para proyectos terrestres. Utiliza giróscopos FOG y tiene integrado un receptor GNSS. Puede alcanzar precisiones de  $0.007^\circ$  para el cabeceo y de  $0.003^\circ$  para el alabeo y giro. Existen tres modelos disponibles con velocidades que oscilan entre 128 Hz y 400 Hz (IGI, 2013).



Figura 421: IGI AEROcontrol.

### B.5.2. Applanix POS AV

Applanix, perteneciente a Trimble, es el fabricante de IMU más utilizado por diferentes sistemas aerotransportados y terrestres, además de los propios de Trimble. Tiene el sistema POS AV destinado a sistemas aerotransportados que utiliza giróscopos MEMS en los modelos 310, 410 y 510, y giróscopos RLG en el modelo 610. Su uso y precisiones son variables. Por ejemplo, se tienen precisiones de  $0.10^\circ$  para el cabeceo y  $0.03^\circ$  para el alabeo y giro en el modelo 310 que apenas pesa 1.25 kg, destino a fotogrametría aérea de baja altura. Y se tienen precisiones de  $0.005^\circ$  para el cabeceo y  $0.0025^\circ$  para el alabeo y giro en el modelo 610 que pesa 4.5 kg y que es la unidad de mejor precisión. Con unas precisiones similares, Applanix ofrece la familia para MMS, denominada POS LV (Trimble, 2013).

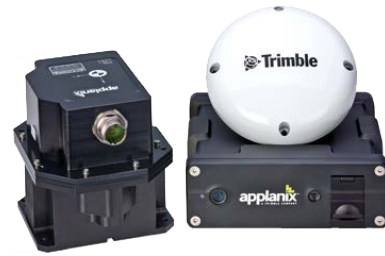


Figura 422: Applanix POS AV.

### B.5.3. Leica IPAS 20

La compañía suiza también ofrece un IMU que incluye en sus sistemas aerotransportados. Ofrece cuatro modelos con tecnología y características diferentes. Disponen de dos modelos (NUS4 y DUS5) basados en FOG, de 200 Hz con una precisión máxima de  $0.008^\circ$  de cabeceo y  $0.005^\circ$  de alabeo y giro. Otro modelo (NUS5) basado en DTG y 500 Hz de frecuencia con una precisión de  $0.008^\circ$  de cabeceo y  $0.005^\circ$  de alabeo y giro. Y ofrecen otro modelo (CUS6) basado en RLG de 200 Hz con una precisión de  $0.005^\circ$  de cabeceo y  $0.0025^\circ$  de alabeo y giro. Tiene un precio aproximado de 230 mil euros (Leica, 2013).



Figura 423: Leica IPAS 20.

### B.5.4. Honeywell

Esta compañía americana fabrica IMU con varios propósitos, sobre todo para guiado de misiles, cohetes y UAV. Para estos propósitos, tiene varios modelos muy compactos basados en tecnología MEMS de bajo coste (HG1900 y HG1930). También tiene un modelo (HG1700) basado en RLG. Es el modelo HG1700 que opera entre 100 Hz y 600 Hz. Pesa menos de 1 kg (Honeywell, 2013).



Figura 424: Honeywell HG1700.

### B.5.5. IXBLUE AIRINS

Sistema inercial de la empresa americana basada en giróscopos FOG. Apto para llevar sobre aviones y helicópteros gracias a su pequeño tamaño (4.5 kg). Dependiendo del posicionamiento GNSS utilizado, pueden llegar a precisiones de  $0.005^\circ$  en el cabeceo y  $0.0025^\circ$  para los otros dos ángulos. Tiene una frecuencia de 200 Hz. Esta empresa, que también construye sistemas inerciales para satélites, tiene otro modelo para MMS denominado LANDINS, con la misma frecuencia y precisiones sensiblemente inferiores (IXBLUE, 2013).

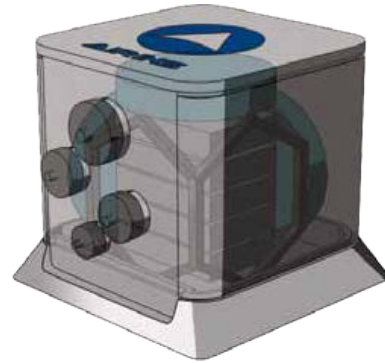


Figura 425: IXBLUE AIRINS.

# Especificaciones técnicas de aplicaciones informáticas

## C.1. Introducción

Una parte importante del flujo de trabajo mediante técnicas LiDAR es el tratamiento digital de la información. De hecho, una parte importante del tiempo consumido en la generación de un archivo de representación 3D del objeto, es la edición por medio de aplicaciones especializadas. Sin embargo, el desarrollo de aplicaciones específicas para LiDAR no ha seguido la misma velocidad que el avance tecnológico de los sensores. Como se ha visto, estos dispositivos permiten medir gran cantidad de puntos con mucha precisión, pero no se dispone de un abanico amplio de posibilidades informáticas para poder gestionar tal volumen de información. Quizás, ahora, con la proliferación de ordenadores con arquitectura de 64 bits puede verse un importante avance, puesto que no se tendrán las limitaciones de sistemas 32 bits en cuanto a memoria RAM se refiere (máximo 4 GB).

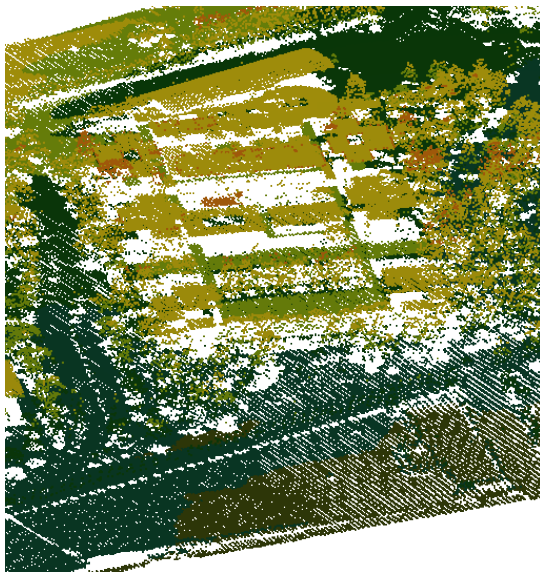


Figura 426: Visualización de datos LiDAR mediante puntos.



Figura 427: Visualización de datos LiDAR como MDT.

Estas herramientas son potentes en la visualización de datos, ya que deben gestionar millones de puntos, facilitando evaluar la calidad del conjunto de datos, permitiendo la planificación y el control de los diferentes procesos y, finalmente, ofreciendo la presentación del producto final. La mayoría de las aplicaciones tiene una interfaz gráfica que permite mostrar la nube de puntos pudiendo elegir entre una gran variedad de opciones y funcionalidades. La forma más sencilla mostrará todos los puntos con un solo color y tamaño, pero se podrán variar otras características, como la intensidad de retorno, número de eco, color RGB si está disponible, color en función de la elevación, clase o cualquier otro atributo. Algunas aplicaciones permitirán cambiar entre la representación de la nube de puntos y la representación del MDT generado a partir de ellos.

Otras operaciones básicas de visualización son la selección de puntos para su edición, la realización de medidas en la nube de puntos, el ajuste de figuras geométricas por aproximación o la generación de perfiles para mejorar el análisis de superficies (Fernandez, et al., 2007).

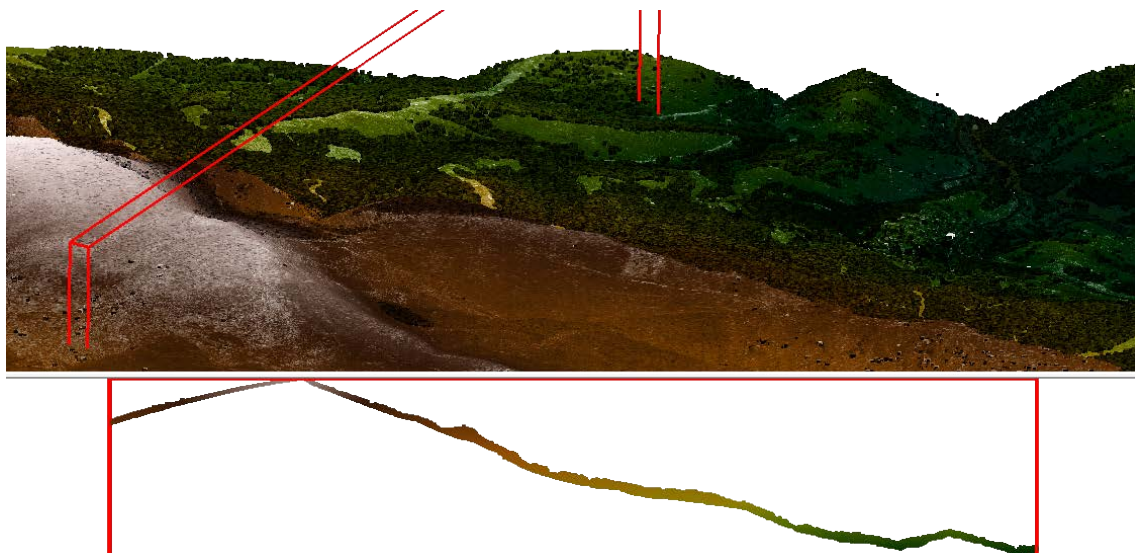


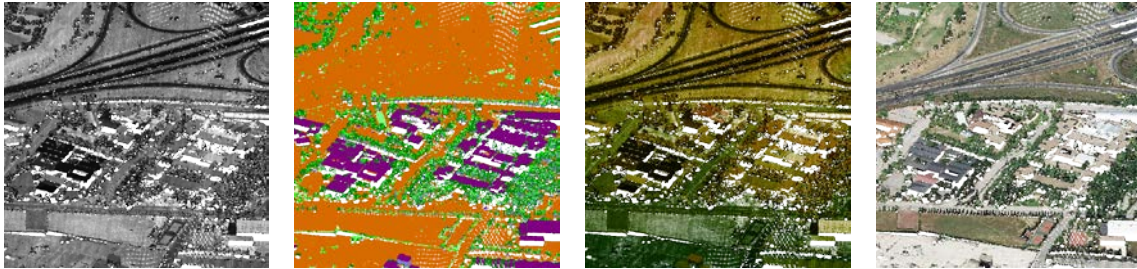
Figura 428: Perfil generado sobre la nube de puntos.

En las aplicaciones LiDAR son fundamentales las herramientas para la edición de los puntos registrados. Estas herramientas deben permitir la segmentación, clasificación y filtrado. La segmentación permite la separación de puntos en función de sus características, por ejemplo, intensidad, eco, color, altura, etc. La clasificación permite diferenciar puntos en función del objeto al que pertenecen, es decir, suelo desnudo, edificación, vegetación, líneas eléctricas, etc. El filtrado es la operación que permite eliminar puntos en función de una segmentación o clasificación previa, por ejemplo, para calcular un modelo digital sólo con puntos pertenecientes al suelo desnudo.

Por otro lado, también se debe disponer de un conjunto de herramientas de transformación geométrica que permitan realizar rotaciones, translaciones, recortes, fusión de diferentes pasadas o estacionamientos y, por supuesto, cambio de sistema de referencia (tanto planimétrico como altimétrico).



Tabla 41: Nube de puntos LiDAR visualizada con diferentes características. De izquierda a derecha, intensidad, clasificación, tintas hipsométricas y color registrado con cámara óptica.



A continuación, se van a mostrar algunas de las aplicaciones de gestión de puntos LiDAR, diferenciado entre aquellas destinadas para proyectos aéreos y proyectos terrestres. Algunas de ellas tienen versiones de demostración con las que se han realizado pruebas con algunos de los archivos experimentales.



## C.2. LiDAR aéreo

### C.2.1. MARS

Software de la empresa americana Merrick para la visualización y edición de datos LiDAR. Se ofrecen tres versiones diferentes: Viewer (gratuito), Explorer (4000 €) y Explorer QC (8300 €). Existen versiones para 32 y 64 bits. Permite la carga ilimitada de datos, pudiendo ser LiDAR, imagen o cartografía vectorial. Posee herramientas de clasificación y filtrado de datos interactivas y automáticas. No tiene herramientas de transformación geométrica de puntos. Actualmente, está disponible la versión 7 (Merrick, 2013).

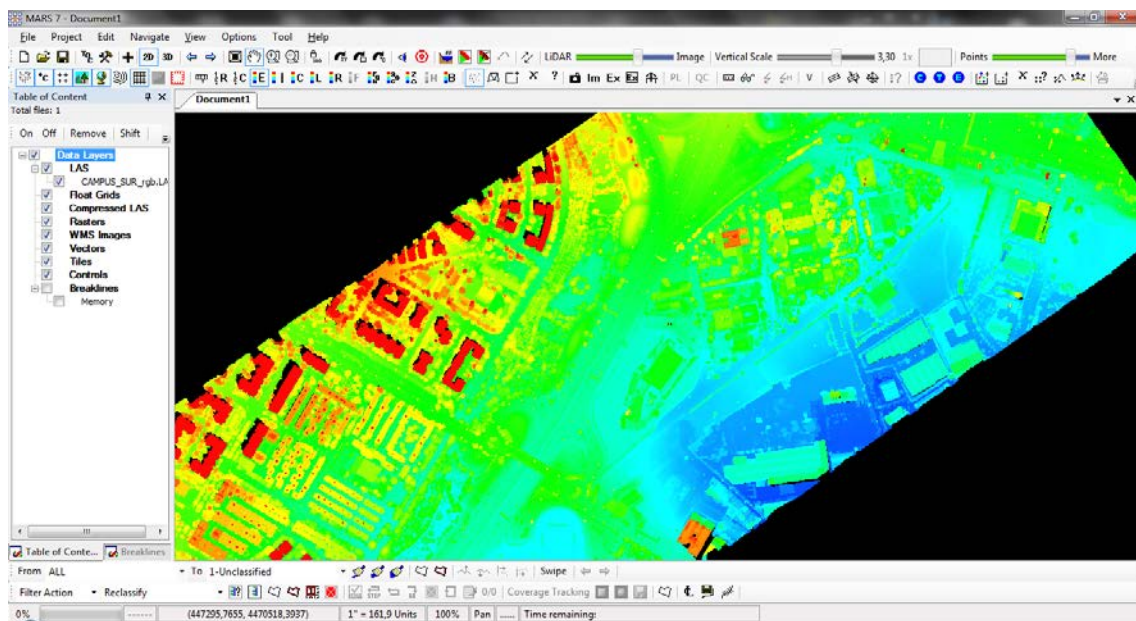


Figura 429: MARS de Merrick.

### C.2.2. Terrasolid Suite

Aplicación de la empresa finlandesa Terrasolid de amplia distribución en la gestión de datos LiDAR. Tiene múltiples módulos en función de la aplicación, cuyo precio oscila entre 3000 € y 13000 €. Funciona bajo Bentley MicroStation v8. Actualmente, está en el mercado la versión 11. El paquete más completo incluye los módulos TerraScan, TerraModeler, TerraPhoto y TerraMatch (Terrasolid, 2013).

TerraScan es el módulo de procesamiento de las nubes puntos LiDAR. Permite visualizar la nube de puntos en un entorno gráfico 2D y 3D. Permite la clasificación de forma interactiva y no asistida, utilizando categorías por defecto o definidas por el usuario. Además permite digitalizar entidades sobre los puntos. Trabaja mediante proyectos para subdividir las zonas en archivos asequibles para su gestión.

TerraModeler es el módulo para el cálculo de MDT a partir de las nubes de puntos utilizando triangulación. Estos modelos pueden utilizarse para construir elementos 3D, visualizar la superficie, generar curvas de nivel, generar perfiles o calcular volúmenes.

TerraPhoto proporciona la capacidad de fusionar fotografías aéreas con datos láser. Se puede utilizar para crear mosaicos de ortofotos a partir de datos LiDAR, “true-orto”, o modelos digitales con las imágenes ortorrectificadas como tapiz, etc.

TerraMatch se utiliza para calibrar los datos láser y resolver los desajustes (del IMU o del escáner láser) que puedan surgir entre los datos procedentes de diferentes pasadas.

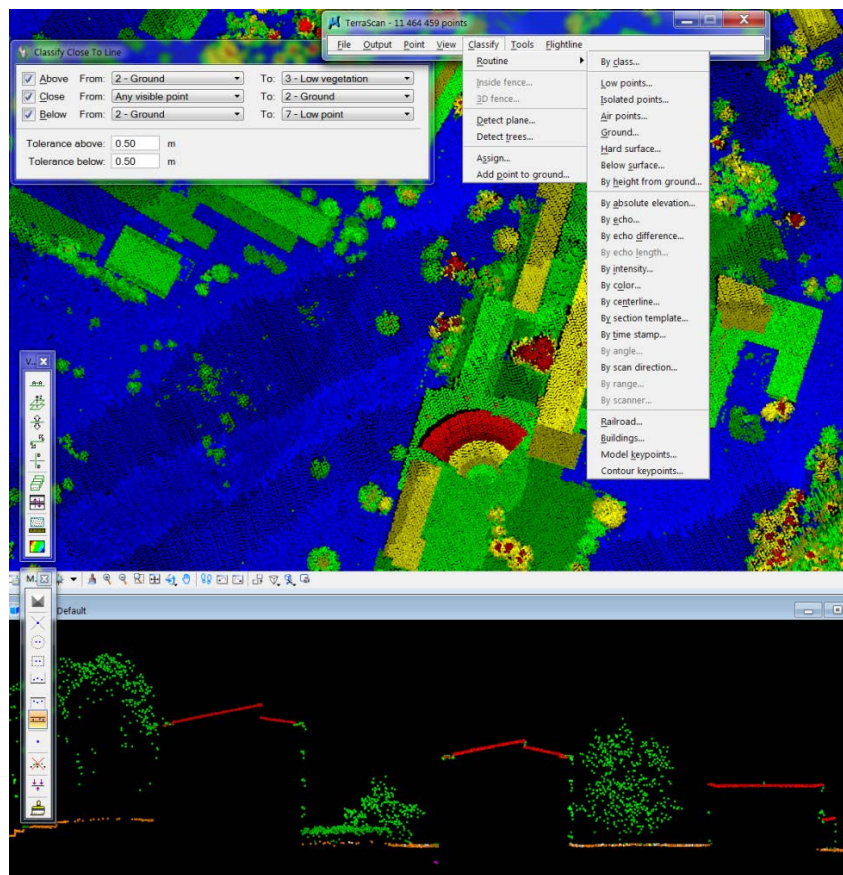


Figura 430: TerraScan sobre MicroStation.

### C.2.3. Fledermaus

Aplicación de la empresa holandesa QPS, dedicada, sobre todo, a la visualización de datos geospaciales relativos a hidrografía. La versión actual es la 7. No obstante, se puede utilizar para una amplia variedad de aplicaciones a partir de datos obtenidos por diversos sensores remotos. Se pueden extraer perfiles en tiempo real, así como generar películas. Además se pueden realizar visualizaciones en estéreo. Sin embargo, no tiene herramientas de transformación geométrica de puntos. Existen versiones para Windows, Linux y Mac (QPS, 2013).

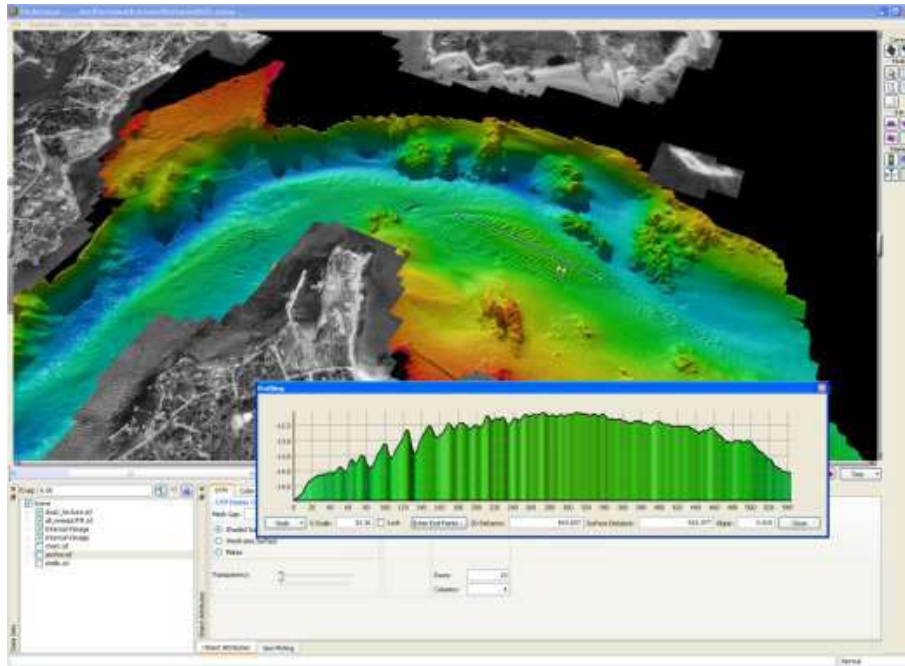


Figura 431: Fledermaus.

## C.2.4. Quick Terrain Modeler

Aplicación de tratamiento de datos LiDAR aéreo de la empresa americana Applied Imagery. La versión actual es la 7.1.6. Posee herramientas de visualización, edición y clasificación de los puntos. Tiene varios formatos de entrada de datos, incluidos el comprimido LAZ. Permite visualizar la nube de puntos en un entorno gráfico 2D y 3D. También permite realizar análisis sobre el DEM, como perfiles, cálculos de punto de vista, etc. Según la memoria RAM del ordenador, permite cargar varios centenares de millones de puntos (Applied Imagery, 2013).

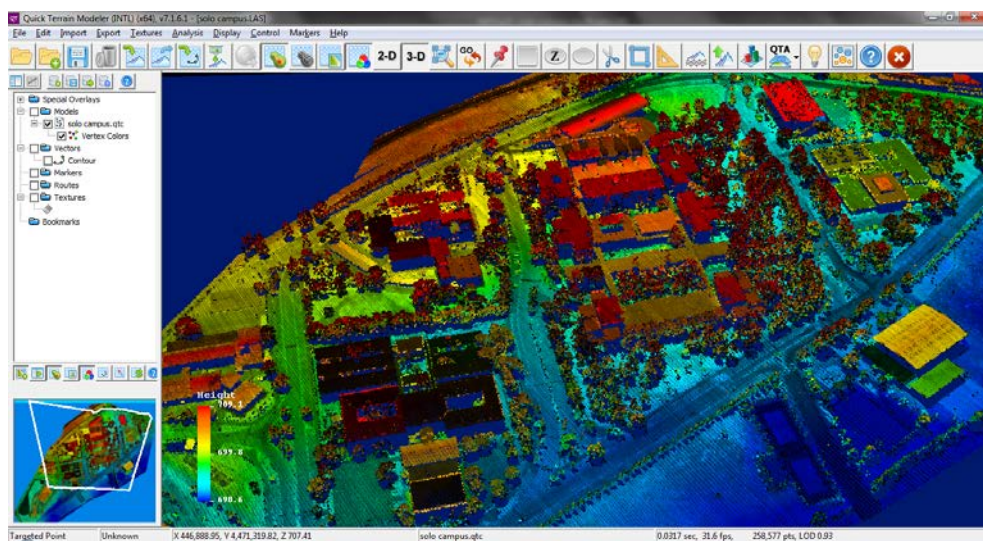


Figura 432: Quick Terrain Modeler.



### C.2.5. MDTopX

Aplicación de desarrollo español de Digi21 que permite la edición, gestión y explotación tanto de modelos digitales como de datos LiDAR. Permite la visualización en 2D y 3D. El paquete completo (MDTopX Suite) tiene cuatro módulos diferentes, además del módulo básico: Láser, VirtuaLand, Viales y Ortofoto. Su precio es de 3500 €. La aplicación funciona bajo Windows en 32 bits o 64 bits (Digi21, 2013).

La versión básica permite calcular modelos digitales basados en triangulación y rejilla y la generación de datos a partir de ellos: mapas de curvas de nivel, perfiles, movimientos de tierra, mapas de representación del relieve raster, etc.

El módulo Láser permite la gestión de archivos procedentes de ALS y TLS. Tiene varios algoritmos de clasificación de puntos no asistidos, así como herramientas interactivas para la edición de datos, incluyendo la posibilidad de edición mediante perfiles y la transformación entre diferentes sistemas de referencia o cálculo de la altitud ortométrica. También realiza ajustes entre pasadas. Permite calcular tetraedrizaciones con datos procedentes de escáneres láser terrestres.

El módulo VirtuaLand permite generar modelos de realidad virtual con la inclusión de objetos de edificaciones o vegetación, así como aplicar texturas a partir de imágenes raster (ortofotos). Permite la generación de videos interactivos.

El módulo Viales permite calcular trazados de carreteras sobre modelos digitales o nubes LiDAR, mediante el cálculo de clotoides, rasantes, secciones tipos, peraltes, etc. Permite la recreación virtual del vial.

El módulo de Ortofoto permite el cálculo de la ortorrectificación de imágenes cónicas, incluyendo *true-orto*, cálculo de líneas de unión (*seam-lines*), mosaicos, etc.

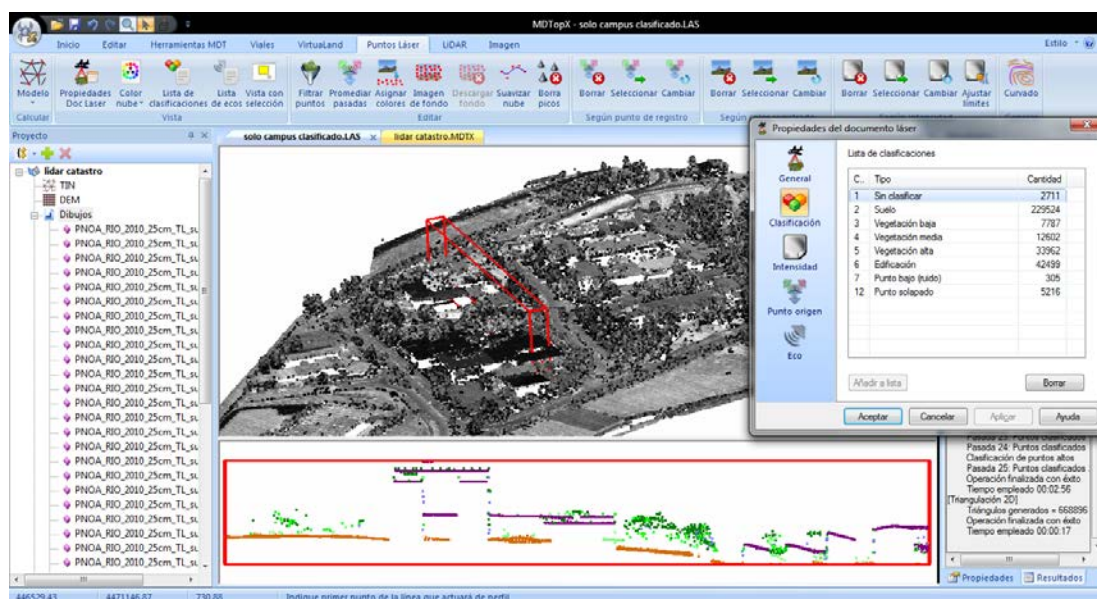


Figura 433: MDTOPX de Digi21.

### C.2.6. SCOP++

Aplicación de la empresa alemana Inpho, perteneciente al grupo Trimble. Permite la edición de modelos digitales procedentes de datos LiDAR u otra fuente de información. Posee herramientas de visualización, edición, filtrado y gestión de modelos con centenares de millones de puntos. Tiene diversos formatos de entrada/salida de datos procedentes de imágenes, modelos o datos tridimensionales. Inpho ofrece un paquete completo denominado LiDAR Suite donde se integran SCOP++ y DTMaster. Los algoritmos han sido desarrollados conjuntamente con el Instituto de Fotogrametría de la Universidad Técnica de Viena (Inpho, 2013).

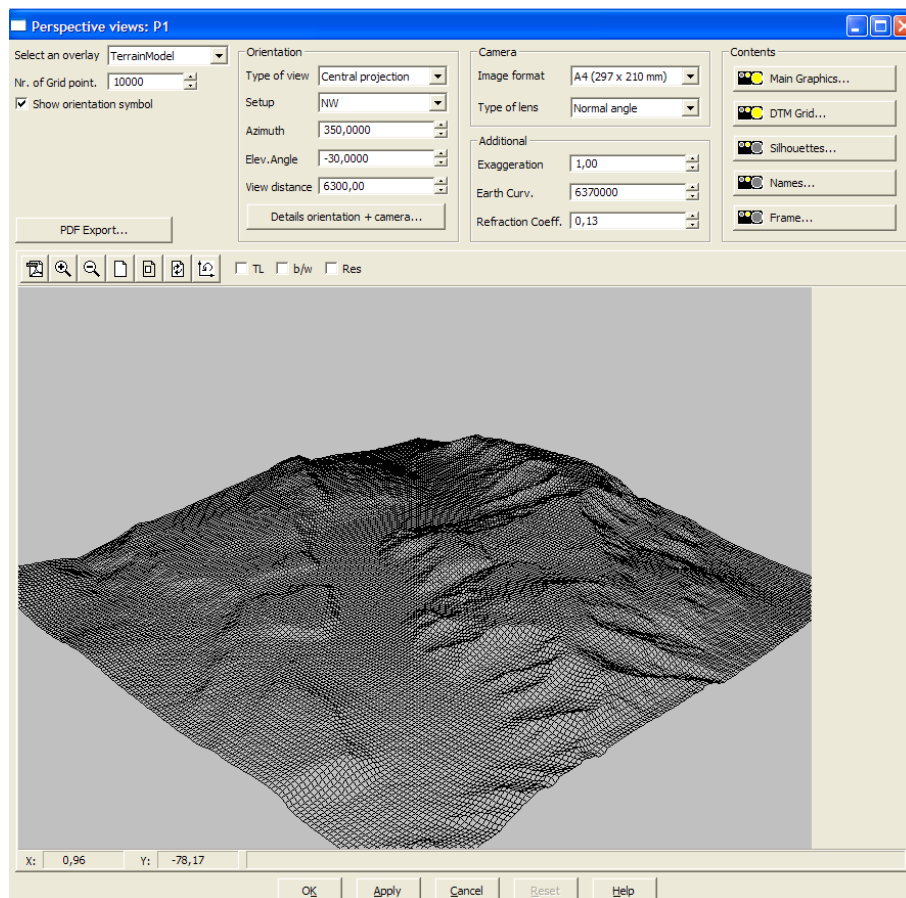


Figura 434: Inpho SCOP++.

## C.3. LiDAR Terrestre

### C.3.1. RealWorks

Aplicación de Trimble destinada al tratamiento de información procedente de escáneres láser terrestres, especialmente los propios de la marca. Tiene un módulo para extraer y gestionar los datos del escáner o de otros sistemas de registro. Posteriormente, tiene tres versiones diferentes de edición: Standard, Advanced y LASERGen. Posee diversas herramientas para calcular perfiles, curvas de nivel o aplicar superficie prediseñadas: planos, cilindros, prismas, etc., útiles en diseño industrial. No importa archivos LAS. Actualmente, está disponible la versión 8. Tiene un precio aproximado de 10 mil euros (Trimble, 2013).

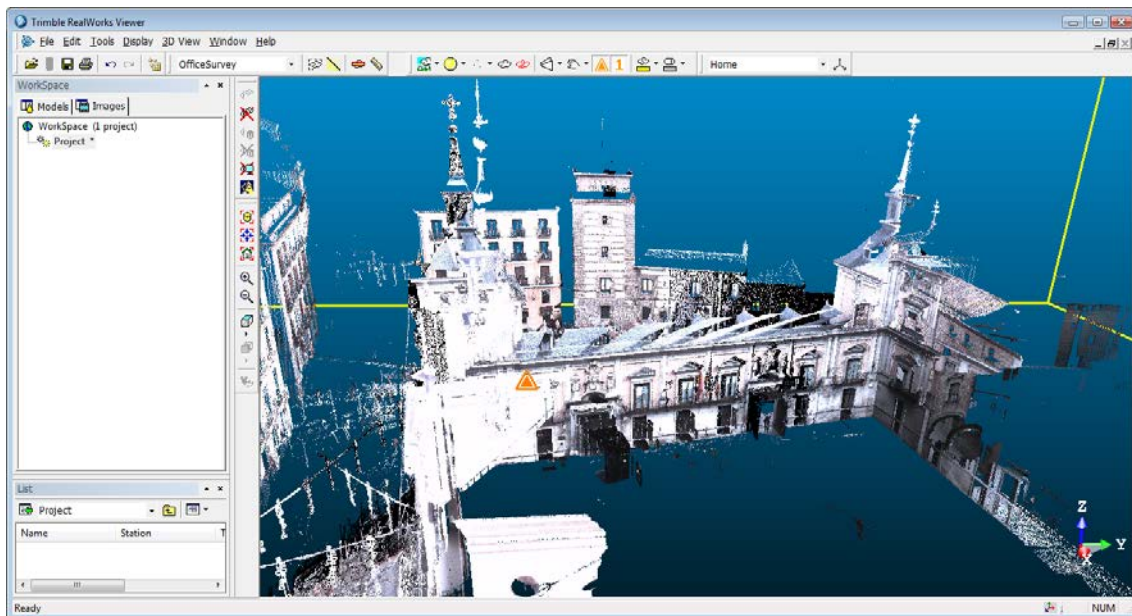


Figura 435: Trimble RealWorks.

### C.3.2. 3DReshaper

Aplicación de modelado de la empresa francesa Technodigit, perteneciente al grupo Hexagon. Tienen múltiples campos de aplicación como patrimonio, industria, modelos digitales para Topografía o Medicina. Permite datos de entrada procedentes de varias técnicas de medición como escáneres basados en triangulación, TOF, etc. No tiene límite de puntos y permite la fusión de nubes de puntos de varios estacionamientos, registrar tridimensionalmente, calcular modelos digitales suavizados, NURBS, etc. Tiene versiones de 32 y 64 bits, y la versión actual es la 7.1 (Technodigit, 2013).



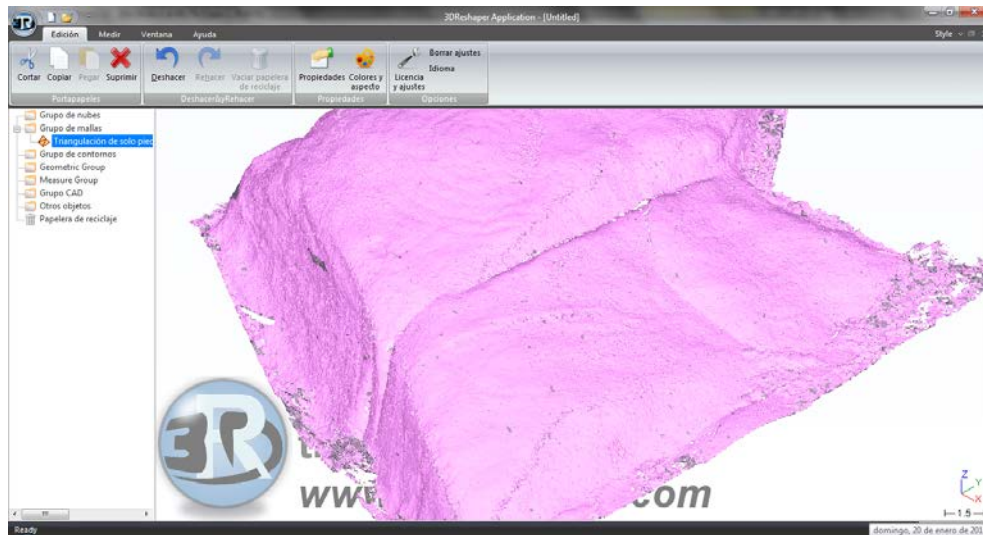


Figura 436: 3DReshaper.

### C.3.3. Cyclone

Aplicación para los usuarios de los escáneres láser de Leica. Se compone de un conjunto de módulos con funciones diferentes como el módulo SCAN para controlar el funcionamiento del escáner, el módulo REGISTER para fusionar las nubes de puntos procedentes de diferentes estacionamientos, el módulo MODEL para generar los modelos digitales y exportarlos a programas de CAD o el módulo SURVEY con diferentes herramientas de topografía. Existen versiones de 32 y 64 bits, ambas para Windows, estando disponible actualmente la versión 8. El paquete completo tiene un precio aproximado de 24 mil euros (Leica, 2013).

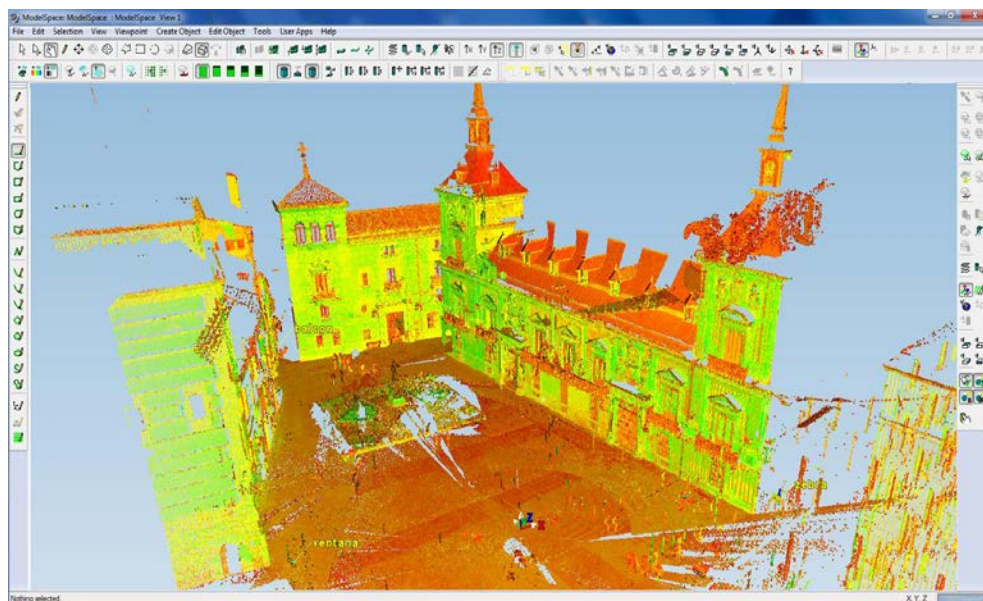


Figura 437: Leica Cyclone.

### C.3.4. PolyWorks

Aplicación de la empresa canadiense Innovmetric, especializada en la gestión de datos LiDAR para aplicaciones industriales, como los procedentes de escáneres láser en la industria de la automoción y aeroespacial, para diseño asistido por ordenador e ingeniería inversa. Actualmente, también tiene un módulo para la gestión de datos ALS.

Polyworks está dividido en módulos: Inspector, Inspector Probing, Modeler, NURBS, Airfoil Gauge y CAD Translators. El módulo más útil es Inspector destinado al control dimensional y que permite visualizar las nubes de puntos mediante la intensidad o el color. El módulo Modeler permite seleccionar puntos individuales y ajustar entidades (círculos, conos, cilindros, planos, líneas poligonales, esferas y vectores) a los puntos seleccionados. El módulo CAD Translators permite convertir las nubes de puntos en los modelos de superficie utilizando las entidades vectoriales. La principal ventaja de PolyWorks es la potencia y cantidad de herramientas disponibles. La desventaja, el precio. La última versión es la 12 y tiene un precio superior a 25 mil euros (Innovmetric, 2013).

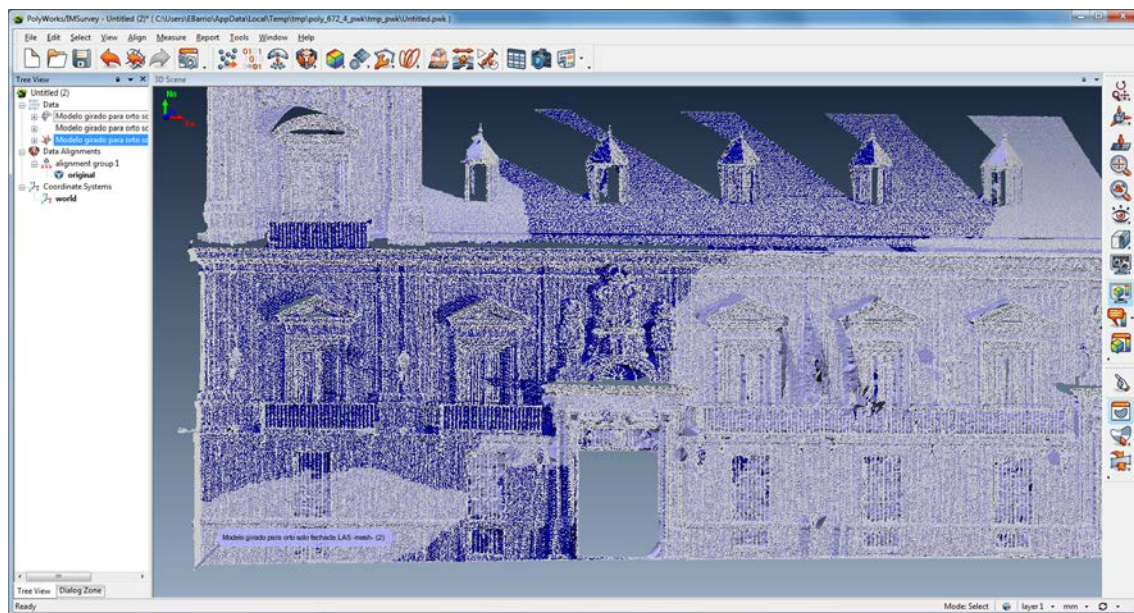


Figura 438: Innovmetric PolyWorks.



# Sistemas de referencia

## D.1. Sistemas de coordenadas tridimensionales

El resultado final de un trabajo geodésico es un conjunto de puntos con coordenadas, nombres y otros parámetros. Para ello, es necesario resolver dos problemas conectados entre sí: fijar el sistema de coordenadas y determinar las coordenadas de los puntos en este sistema. Hay muchos sistemas de coordenadas terrestres. Los sistemas de coordenadas globales están fijados por las coordenadas de los observatorios astronómico-geodésicos fundamentales como Greenwich, Pulvoco, Westford o San Fernando. Los sistemas de coordenadas locales están fijados por las coordenadas de los puntos de una red local. La posición de los nuevos puntos se determina relacionándola con los puntos existentes, siendo posible utilizar diferentes sistemas de coordenadas para resolver cualquier problema.

Es natural utilizar el sistema de coordenadas celestes para resolver problemas relacionados con objetos celestes tales como los satélites y los quásares. La realización práctica de tales sistemas es un sistema de coordenadas ecuatorial y un sistema coordinado conectado a la órbita. Para resolver cualquier problema astronómico-geodésico es necesario medir el tiempo, debido a que los quásares y los satélites cambian de posición en la esfera celeste con el tiempo. Por tanto, los sistemas de coordenadas y los sistemas de tiempo están conectados y no pueden separarse. Esta unión se denomina “sistema de referencia”.

### D.1.1. Sistemas de coordenadas terrestres globales

Aunque la Tierra parezca ser una esfera uniforme cuando se la observa desde el espacio, su superficie dista mucho de ser uniforme. La figura geométrica que más se ajusta a la forma de la Tierra es el elipsoide. Un elipsoide (también conocido como esferoide) es una esfera aplanada o achatada.

El elipsoide elegido será aquel que se ajuste de forma más exacta a la forma de la Tierra. Este elipsoide no es una superficie física, sino que es una superficie definida matemáticamente. Actualmente existen diversos elipsoides o lo que es lo mismo, diferentes definiciones matemáticas de la superficie de la Tierra. Por ejemplo, el elipsoide utilizado por el sistema GPS es conocido como WGS84 o Sistema Geodésico Mundial 1984.

Un punto sobre la superficie de la Tierra (ésta no es la superficie del elipsoide), puede definirse utilizando su latitud ( $\varphi$ ), longitud ( $\lambda$ ) y altura elipsoidal ( $h$ ), como muestra la figura 439.

El sistema convencional de referencia terrestre (CTRS) adoptado para el posicionamiento GPS es WGS84 (cuyo nombre coincide con el del elipsoide utilizado), definido por:

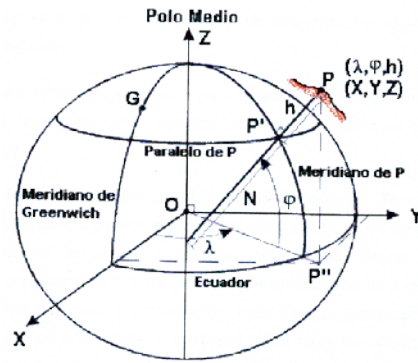


Figura 439: Coordenadas geodésicas de un punto.

- Origen en el geocentro.
- Eje Z paralelo a la dirección del Origen Convencional Internacional (CIO), posición del polo medio en 1903.
- El eje X es la intersección del plano meridiano de referencia y el plano del ecuador astronómico medio.
- El eje Y, situado en este plano y dirigido hacia el este, constituye con el XZ un sistema coordenado rectangular.

El polo real, en cada instante, se mueve alrededor del CIO con un radio de 15 m, aproximadamente. La razón principal del movimiento es la falta de coincidencia del eje de rotación y el eje de inercia de la Tierra. El período de este movimiento es, aproximadamente, de 430 días. Además de éste, hay algunos otros fenómenos que influyen en el movimiento polar, por lo que es complicado determinar completamente su movimiento. La posición del polo respecto al CIO se determina con un error de algunos centímetros utilizando VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) y SLR (*Satellite Laser Ranging*).

Los valores de las constantes son:

- $a = 6378137$  metros (semieje mayor)
- $b = 6356752.3$  metros (semieje menor)
- $u = 3986005 \cdot 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$  (constante gravitacional)
- $\omega = 7292115 \cdot 10^{-11} \text{ rad/s}$  (velocidad de rotación)

La relación entre el semieje mayor y menor y la excentricidad del elipsoide o el aplanamiento viene determinada por:

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad \text{ó} \quad \alpha = \frac{a - b}{a}$$

Donde  $e$  es la excentricidad y  $\alpha$  el aplamamiento que, en este caso, tiene un valor de 298.257223563.

Los sistemas de coordenadas terrestres se diferencian por el tipo y por el método de fijación respecto a la Tierra. De hecho, se pueden tener el sistema coordenado cartesiano rectangular ( $X, Y, Z$ ) y el sistema coordenado elipsoidal ( $\varphi, \lambda, h$ ).

Por tanto, un método para definir la posición de un punto es el sistema de coordenadas cartesiano, que emplea las distancias sobre los ejes  $X, Y$  y  $Z$  desde el origen o centro del esferoide. Este es el método básico que emplean los sistemas GNSS para definir la posición de un punto en el espacio.

El sistema de coordenadas cartesiano es universalmente el más utilizado por su versatilidad, siendo el más conveniente para resolver la mayoría de los problemas. Pero, con frecuencia, es necesario tener una representación clara de la posición, por ejemplo, en navegación. La latitud, longitud y altura proporcionan esta representación clara. Ésta es la razón por la que en GNSS se utilicen ambos sistemas de coordenadas: el geodésico rectangular ( $X, Y, Z$ ) y el geodésico elipsoidal ( $\varphi, \lambda, h$ ). Ambos sistemas están conectados con el mismo elipsoide WGS-84. La relación entre las coordenadas rectangulares y las coordenadas elipsoidales es:

$$X = (N + h) \cos \lambda \cos \varphi$$

$$Y = (N + h) \sin \lambda \cos \varphi$$

$$Z = (N + h) \sin \varphi$$

Donde  $N$  es el radio de curvatura de la sección elipsoidal del plano de la primera vertical y  $e$  es la excentricidad del elipsoide.

Las ecuaciones para transformar desde coordenadas rectangulares a geodésicas son:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$
$$\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$
$$\varphi = \arctan\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2} \left[1 - \frac{e^2 N}{N + h}\right]^{-1}}\right)$$
$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \varphi} - N$$



### D.1.2. Sistemas de coordenadas locales

De la misma manera que con las coordenadas globales, las coordenadas locales o, lo que es lo mismo, las coordenadas utilizadas en la cartografía de una zona en particular, están basadas en un elipsoide local, diseñado para coincidir con el geoide de la zona.

Los elipsoides utilizados en la mayoría de los sistemas de coordenadas locales alrededor del mundo fueron definidos en la primera mitad del siglo XX, antes de la aparición de las técnicas espaciales.

Estos elipsoides tienden a acomodarse lo mejor posible al área de interés, pero no podrían ser utilizados en otras zonas de la Tierra. De aquí que cada país definiera un sistema cartográfico marco de referencia basado en un elipsoide local. Cuando se utiliza un receptor GNSS, las coordenadas de las posiciones calculadas están basadas en el elipsoide WGS84. Para poder obtener estas coordenadas en el sistema de referencia local es necesario realizar una transformación. Las transformaciones posibles están explicadas en el apartado D.3.

La naturaleza de los sistemas GNSS también afecta a la medición de la altura, ya que las alturas están referidas a la superficie del elipsoide WGS84. Éstas se conocen como “alturas elipsoidales”. Como se explica en el siguiente apartado, las alturas utilizadas en Cartografía son alturas ortométricas medidas en relación con el nivel medio del mar, es decir, el geoide.

## D.2. Superficies de referencia altimétricas

### D.2.1. Superficie de nivel

En la representación cartográfica, no se puede considerar la Tierra como plana, ya que aún en distancias cortas se observa un error. Este error es debido a la imposibilidad de adoptar un plano como superficie de comparación. Por tanto, los datos y resultados altimétricos se deben referir a superficies que pueden no ser ni planas ni paralelas y que se denominan “superficies de nivel” o “superficies equipotenciales”. Éstas se definen como aquellas en las que el trabajo es constante independientemente de los puntos que se tomen y, permaneciendo en estos puntos, la superficie normal a la dirección de la vertical.

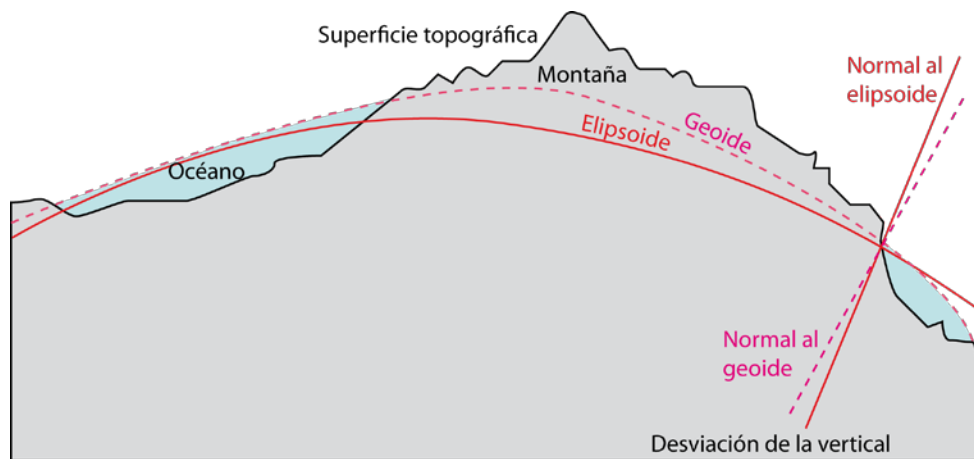


Figura 440: Geoide y elipsoide.

Estas superficies serían equivalentes a las superficies que alcanzaría el mar en sucesivas crecidas. Dentro de los límites de la Topografía, las superficies de nivel se pueden considerar como esféricas y, por tanto, equidistantes y paralelas, ya que en las precisiones exigidas este hecho no afectaría a los resultados. Sin embargo, no se puede hacer esta aproximación cuando se consideren grandes extensiones de terreno.

### D.2.2. Cota, desnivel y altitud

Los trabajos altimétricos tienen por objeto la determinación de la altura de los puntos característicos del terreno, sobre una superficie de nivel que se toma como superficie de comparación. La distancia de un punto a una superficie de nivel determinada se denomina “cota”.

Dada la arbitrariedad de la elección de las superficies de comparación y con el fin de evitar que no se pudieran relacionar entre sí trabajos diferentes, es preferible utilizar una misma superficie de referencia a la que se asigna cota cero. Esta superficie es la superficie media de los mares en calma (en España, referido al nivel medio del mar en Alicante) o

“geoide”. A la altura de un punto respecto o sobre este origen de altitudes se le denomina “altitud”.

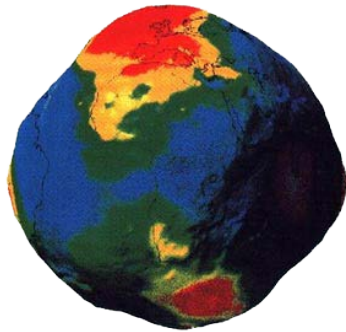


Figura 441: El geoide.

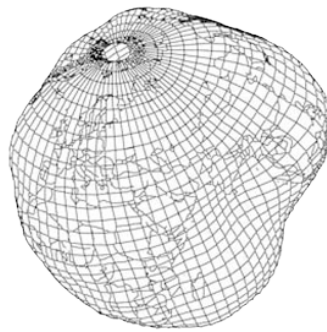


Figura 442: El geoide.

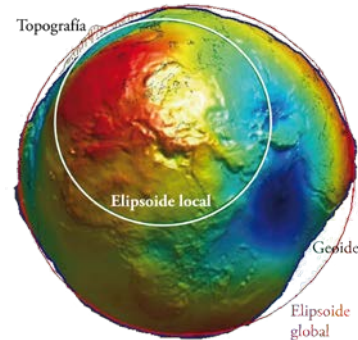


Figura 443: El geoide y los elipsoides.

En todo trabajo alimétrico, se parte de la altitud conocida de un punto y se deben hallar las altitudes del resto de los puntos. Se denomina “desnivel” a la diferencia de altitud o cota entre dos puntos.

### D.2.3. Corrección ortométrica

Aunque en Topografía se pueden considerar paralelas las superficies de nivel, en realidad esto no es así, debido a que la aceleración de la gravedad no es la misma en todos los puntos de la Tierra.

Los puntos de la superficie terrestre, están sometidos a una aceleración centrífuga, como consecuencia del movimiento de rotación terrestre.

La magnitud de la aceleración centrífuga dependerá del radio de giro, que en cada punto dependerá de su separación del eje polar. Por tanto, la aceleración centrífuga será máxima en el Ecuador y nula en los polos.

Como la componente normal de la fuerza centrífuga hace que disminuya el efecto de atracción terrestre, se deduce que la aceleración de la gravedad aumenta con la latitud.

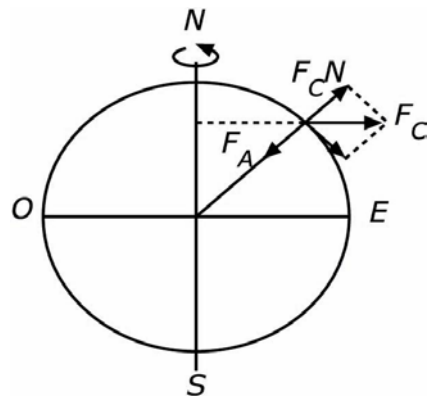


Figura 444: La fuerza centrífuga.

En la figura 444,  $F_C$  representa la fuerza centrífuga,  $F_{CN}$  es la componente normal de la fuerza centrífuga y  $F_A$  es la fuerza de atracción terrestre.

A este hecho se une el achatamiento de la Tierra por los polos, que hace que los puntos del Ecuador estén aún más distantes del eje de giro y, por tanto, la aceleración de la gravedad sea mínima en el Ecuador.

Sean  $ELN$  y  $E'L'N'$  dos superficies de nivel equipotenciales, y  $g_E$  y  $g_L$  la gravedad en  $E$  y  $L$ , respectivamente.

Un trabajo  $T$  para elevar un cuerpo de masa  $m$ , desde  $E$  a  $E'$ , debe ser el mismo que para pasar de  $L$  a  $L'$ . Si se designa por  $H_E$  y  $H_L$  las altitudes de  $E'$  y  $L'$ , se tendrá que:

$$T = m \cdot g_E \cdot H_{E'} = m \cdot g_L \cdot H_{L'}$$

$$\frac{g_E}{g_L} = \frac{H_{L'}}{H_{E'}}$$

Como  $g_E < g_L$  entonces  $H_L < H_{E'}$ , es decir, las superficies de nivel no son paralelas, sino convergentes desde el Ecuador a los Polos.

Teniendo en cuenta lo anterior, podría darse la situación curiosa de que dos operadores, partiendo de los puntos  $E$  y  $E'$ , separados por una altura  $H_{E'}$ , hacia los Polos, manteniendo un desnivel cero en todas sus observaciones, llegarán a los puntos  $N$  y  $N'$  notando que esa separación no corresponde a  $H_{E'}$  sino a  $H_{N'}$ . Las altitudes así obtenidas se denominan “altitudes geopotenciales”.

Esta convergencia hace que se representen anomalías en la medida de altitudes en grandes extensiones siendo necesario introducir una corrección llamada “ortométrica” en las latitudes medidas. Esta corrección es negativa, tanto para el hemisferio norte como para el sur, para los recorridos en que aumente la latitud, y positiva en caso contrario. Por tanto, las altitudes corregidas de corrección ortométrica se denominan “altitudes ortométricas”.

Para dar una idea de la magnitud de la corrección ortométrica basta saber que la convergencia entre las superficies de nivel cero y la de 100 m, es de unos 50 cm desde el Ecuador hasta las Polos. Esto evidencia que para los trabajos topográficos no es necesario aplicar dicha corrección.

Por todo lo expuesto, resulta evidente que los puntos de una misma superficie de nivel no tengan la misma altitud ortométrica. Para ciertas aplicaciones, es conveniente que cada superficie venga representada por un mismo número indicativo. Este número representará el trabajo necesario para elevar la unidad de masa desde la superficie de valor cero hasta la superficie en cuestión. Por tanto, la cota de los puntos de esta superficie de nivel se denomina “cota geopotencial”.

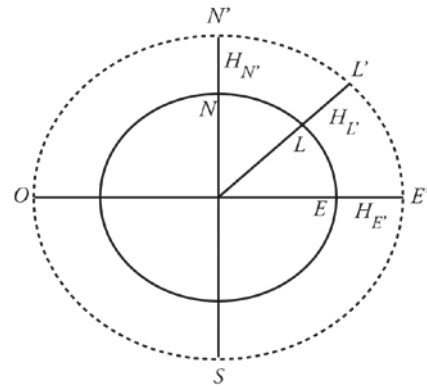


Figura 445: Las superficies de nivel.

Así, para un punto  $A$ , la cota dinámica será:

$$C = \frac{1}{g_{0_{45^\circ}}} \cdot g_{0_\phi} \cdot H$$

Siendo  $g_{0_{45^\circ}}$  la aceleración de la gravedad a  $45^\circ$  de latitud,  $g_{0_\phi}$  la aceleración de la gravedad al nivel del mar y  $H$  la cota ortométrica de  $A$ .

Además, existen modelos geoidales, que permiten convertir las alturas elipsoidales en alturas ortométricas. En áreas relativamente planas, el geoide puede considerarse como constante, pudiendo interpolarse las alturas geoidales a partir de los datos existentes.

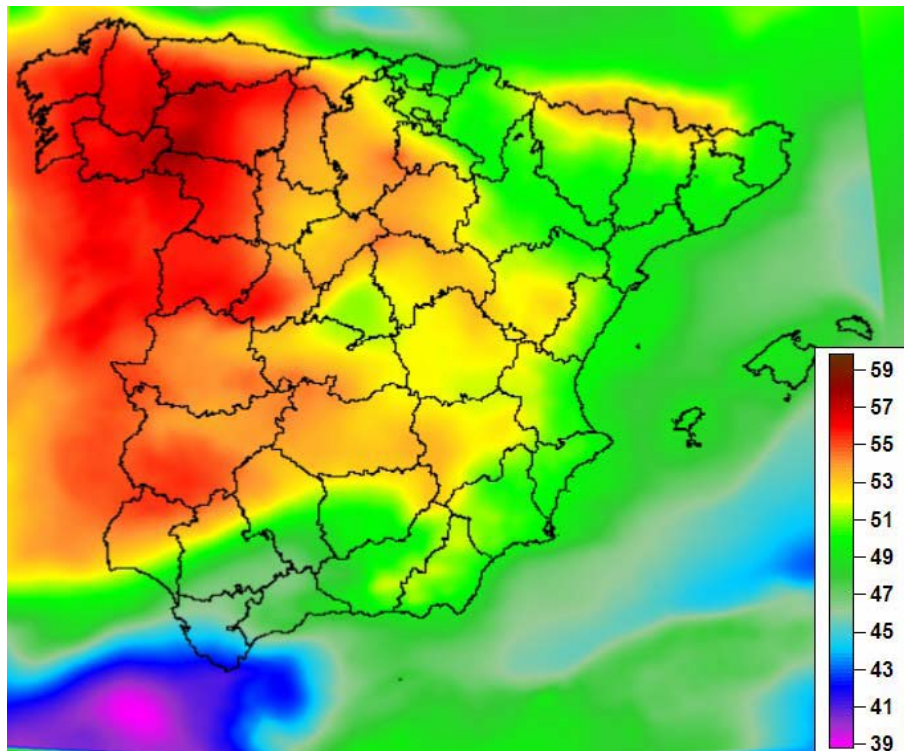


Figura 446: Detalle del modelo del geoide EGM2008 para España peninsular y Baleares (Instituto Geográfico Nacional, 2009).

## D.3. Operaciones entre sistemas de referencia

El propósito de estas operaciones es transformar coordenadas de un sistema a otro. Se han propuesto diferentes métodos para llevar a cabo las transformaciones. La elección de alguno de ellos dependerá de los resultados requeridos. El procedimiento básico de campo para la determinación de los parámetros de transformación es el mismo, independientemente del método a emplear. Primero, se debe contar con coordenadas en ambos sistemas de coordenadas (por ejemplo, en WGS84 y en el sistema local) para tener por lo menos tres puntos comunes. A mayor cantidad de puntos comunes incluidos en la transformación, se tendrá mayor oportunidad de tener redundancia y se podrán verificar los resultados. Se consiguen puntos comunes midiendo los puntos con GNSS, donde las coordenadas y las alturas ortométricas sean conocidas en el sistema local, por ejemplo, en los puntos de control existentes. De esta forma, se pueden calcular los parámetros de transformación, utilizando alguno de los métodos de transformación.

Es importante notar que la transformación sólo se deberá aplicar a los puntos que se encuentren en el área delimitada por los puntos comunes en ambos sistemas. Los puntos fuera de esta área no deberán transformarse utilizando los parámetros calculados, sino que deberán formar parte de una nueva área de transformación.

### D.3.1. Transformación de semejanza (Helmert)

La transformación de siete parámetros de Helmert ofrece una transformación matemáticamente correcta. Esta transformación conserva la precisión de las mediciones GNSS y las coordenadas locales.

En general, la transformación de coordenadas del vector terrestre  $D$  necesita utilizar la fórmula de Helmert:

$$\vec{P}_L = (1 + \mu) \cdot R \cdot \vec{P}_S + \vec{T}$$

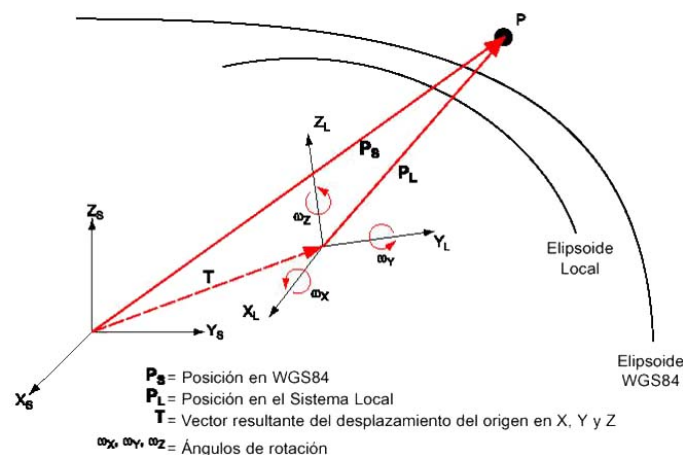


Figura 447: Transformación de siete parámetros de Helmert.



En esta fórmula, se utiliza la siguiente notación:  $\vec{P}_L$  es el vector entre el punto P y el origen de coordenadas de uno de los sistemas,  $\vec{P}_S$  es el vector entre el mismo punto y el origen del otro sistema y  $\vec{T}$  es el vector de cambio del origen de un sistema al otro. El pequeño valor  $\mu$  es una escala de corrección de la unidad; esta corrección tiene en cuenta las diferencias sistemáticas de escala de los dos sistemas.  $R$  es la matriz de rotación:

$$R = R_1(\omega_Z) \cdot R_2(\omega_Y) \cdot R_3(\omega_X)$$

En esta fórmula,  $\omega_{X,Y,Z}$  son los ángulos de rotación alrededor de los ejes X, Y y Z. Estos ángulos son pequeños y  $R$  se representa en forma simplificada como:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{pmatrix}$$

Para transformar el vector tridimensional  $\vec{P}$  es necesario conocer siete parámetros de transformación: tres parámetros de cambio de origen, tres parámetros angulares de rotación y un factor de escala. Por tanto, es necesario tener al menos siete ecuaciones con los siete parámetros de transformación como incógnitas. Si se disponen de tres puntos se obtendrán nueve ecuaciones, teniendo, por tanto, dos ecuaciones redundantes. Este método tridimensional se utiliza para grandes territorios con dimensiones de miles de kilómetros.

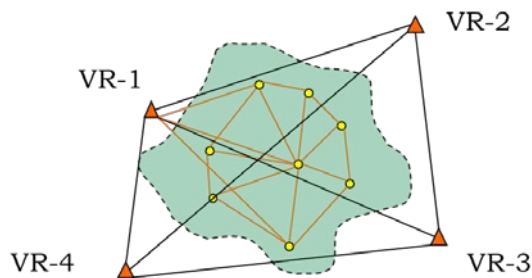


Figura 448: Puntos comunes exteriores a la zona de trabajo.

En la gran mayoría de casos, los puntos medidos previamente no serán tan precisos como los puntos medidos con GNSS, lo cual puede provocar una falta de homogeneidad en la red. Al transformar un punto entre diferentes sistemas de coordenadas, lo mejor es tener en cuenta que lo que cambia es el origen desde el cual se derivan las coordenadas y no la superficie sobre la cual se apoyan.

La experiencia ha demostrado que, comúnmente, los levantamientos con GNSS son medidos con un nivel de precisión mayor que los antiguos levantamientos efectuados con instrumentos topográficos.

### D.3.2. Otros métodos de transformación

En áreas pequeñas, es más frecuente el uso de transformaciones de dos dimensiones. Antes de transformar, el vector de línea base  $\bar{P}$  se reduce a coordenadas planas de una proyección geodésica. Es este caso, hay cuatro parámetros de transformación: dos parámetros de cambio de origen, un parámetro angular de rotación y un factor de escala. Dos puntos proporcionan cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas correspondientes a los parámetros de transformación. En la práctica, solamente se determinan los parámetros de cambio de origen. Un punto elegido como principal será el que determine el sistema de coordenadas de referencia. Al menos otros dos puntos se utilizan para comprobar la exactitud de las coordenadas del punto principal.

El método de transformación de Helmert es matemáticamente correcto pero no tiene en cuenta las irregularidades en el sistema local y, para obtener valores precisos de altura, debe conocerse el valor de la ondulación geoidal. Por el contrario, la “transformación afín” no se basa en el conocimiento del elipsoide local ni de la proyección. Las inconsistencias en las coordenadas locales se tratan modificando las coordenadas GNSS para poder encajar de manera homogénea en el sistema local. Además, si se tiene disponible suficiente información altimétrica, se puede construir un modelo de alturas. De esta manera, se compensa la falta de información de ondulación geoidal, siempre y cuando se cuente con suficientes puntos de control.

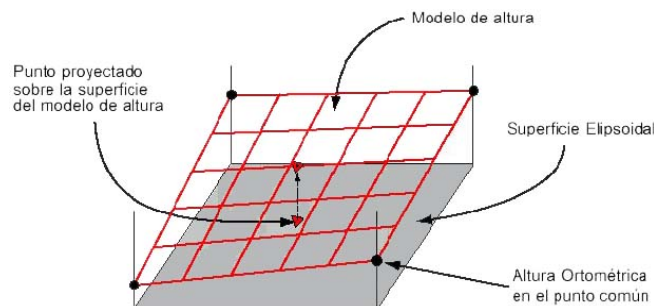


Figura 449: Modelo de altura generado por cuatro puntos.

Un método alternativo al de interpolación es el llamado de “un paso”, el cual trabaja también con las transformaciones de altura y posición de forma independiente. Para transformar la posición, las coordenadas WGS84 se llevan a una proyección Transversa de Mercator temporal. De esta forma, se calculan los giros, desplazamientos y el factor de escala de la proyección “temporal” a la proyección verdadera. La transformación de la altura es un cálculo de la misma en una sola dimensión. Este tipo de transformación se puede emplear en áreas donde no se conoce el elipsoide local ni la proyección y donde además, el geoide se mantiene razonablemente constante. Tanto el método de interpolación como el de un paso deben estar limitados a un área de más o menos 15 km de lado.

Una combinación de los métodos de transformación de Helmert e interpolación se puede encontrar en el método “Stepwise”. Este método emplea una transformación de Helmert 2D para obtener la posición planimétrica y una interpolación para obtener las alturas. Sin embargo, requiere del conocimiento del elipsoide local y de la proyección.

## D.4. Proyecciones cartográficas

En la mayoría de proyectos se registran coordenadas en un sistema de cuadrícula ortogonal. Esto significa que los puntos están definidos por su coordenadas Este, Norte y altura ortométrica (altura sobre el nivel del mar). Las proyecciones cartográficas permiten representar una superficie curva tridimensional (superficie terrestre) sobre un soporte bidimensional (papel o pantalla). Estas proyecciones se muestran como planos, pero realmente definen pasos matemáticos para especificar las posiciones sobre un elipsoide en términos de un plano.

La elección del sistema de representación depende del propósito final de la cartografía. En general, los mapas han de satisfacer una serie de propiedades geométricas, conservando rumbos de navegación o loxodrómicas, conservando ángulos sobre la superficie terrestre y la cartografía, o bien manteniendo la proporción de las distancias en algunas direcciones u otras respetando la equivalencia de superficies. De hecho, se podrían clasificar las proyecciones en función de los parámetros que conservan:

- Equidistantes: Conservan las distancias.
- Equivalentes: Respetan las proporciones de las superficies.
- Conformes: Mantienen los ángulos.
- Afilácticas: No conservan ningún parámetro, pero mantienen valores aceptables de deformación para ellos.

Los sistemas de representación basándose en definiciones geométricas pueden ser:

- Proyecciones: Se obtienen proyectando la superficie terrestre sobre un plano, desde un punto, denominado vértice de la proyección.
- Desarrollos: Considerando una superficie cónica o cilíndrica tangente al elipsoide desarrollando posteriormente la superficie.

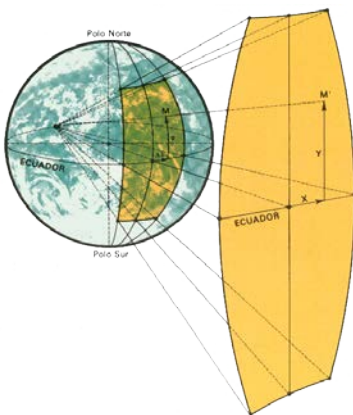


Figura 450: Proyección cartográfica.

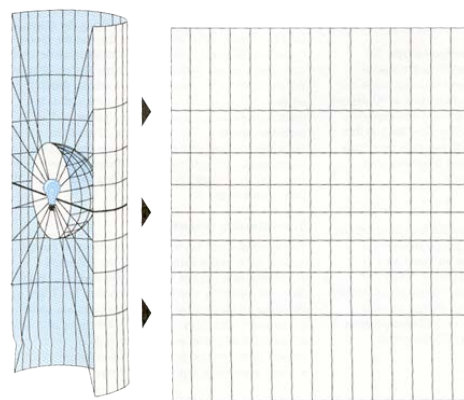


Figura 451: Desarrollo cilíndrico directo.

Dentro de los desarrollos cilíndricos existen dos tipos, directo y transverso. Los desarrollos directos, se realizan situando en cilindro tangente al ecuador elipsoidal con lo que los meridianos serán paralelos entre sí. En los desarrollos transversos, el cilindro es tangente a un meridiano, con lo que la red de paralelos será perpendicular al meridiano central, tangente al cilindro.

Una de las proyecciones más utilizadas es la UTM (Universal Transversa de Mercator). Está basada en un desarrollo transverso conforme de Gauss y considera a la Tierra como un elipsoide de revolución tangente interiormente a un cilindro, cuyo eje está situado en el plano del Ecuador. Las fórmulas obtenidas son válidas para todo el mundo pues empleando husos de  $6^\circ$  se representa la totalidad del globo. La proyección UTM es conforme, siendo el meridiano central de cada huso automecóico y representado por una línea recta.

La UTM se define por:

- Falso Este y falso Norte.
- Latitud de origen: Ecuador.
- Meridiano central.
- Factor de escala sobre el meridiano.
- Ancho de Zona.

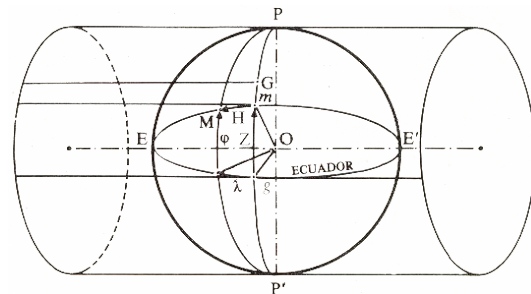


Figura 452: Desarrollo transverso conforme de Gauss.

El falso Este y el falso Norte se definen de tal manera que el origen de la cuadrícula de la proyección se pueda ubicar en la esquina inferior izquierda, tal como lo establece la convención general. Con esto se elimina la posibilidad de coordenadas negativas. El falso Norte toma un valor de 10000000 m para los países al sur del Ecuador y de 0 para los situados al norte. El falso Este adquiere para ambos el valor de 500000 m

El Meridiano central define la dirección del norte de la cuadrícula y la longitud del centro de la proyección.

El factor de escala, también conocido como coeficiente de anamorfosis lineal, varía sólo en la dirección este-oeste. Toma su valor mínimo en el meridiano central y crece según un punto se aleja de él. Al no variar en la dirección norte-sur, esta proyección es la más adecuada para cartografiar áreas que se extienden en dirección norte-sur.

La proyección UTM cubre al mundo entre los  $80^\circ$  de latitud norte y los  $80^\circ$  de latitud sur. Se divide en zonas de  $6^\circ$  de longitud con zonas adyacentes que se superponen  $30'$ . El parámetro que las define es el Meridiano Central o el Número de la Zona (cuando se define uno, el otro queda implícito).

El ancho de Zona define la porción del esferoide en la dirección este-oeste sobre la cual se aplica la proyección.



# Manual de usuario

## E.1. Buscar puntos elevados

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR en función de las propiedades geométricas que un punto tiene con su entorno.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

- Distancia máxima entre puntos: Distancia máxima para considerar dos puntos como adyacentes o vecinos en el terreno. Este parámetro dependerá de la densidad de puntos. No es adecuado poner un valor demasiado elevado porque ello provocará que se consideren puntos muy alejados del punto en consideración. Si se indica un valor demasiado escaso, no se podrá relacionar el punto en consideración con ningún otro punto.
- Altura mínima de elevación: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se cambie su clasificación.
- Es vegetación baja (no busca superficies): Si se está buscando vegetación baja, cuya diferencia de altura es igualmente baja, se debería activar esta opción para que el programa no intente buscar superficies encerradas entre los puntos clasificados, ya que se podrían llegar a clasificar puntos no deseados.
- Iterar mientras se clasifiquen más de x puntos: El proceso de clasificación puede mejorar si se realizan iteraciones. Por ello, se puede indicar una cantidad mínima de puntos por encima de la cual el programa automáticamente repite el proceso. Por tanto, estas iteraciones se detendrán cuando no se clasifiquen más puntos de los indicados en este campo.

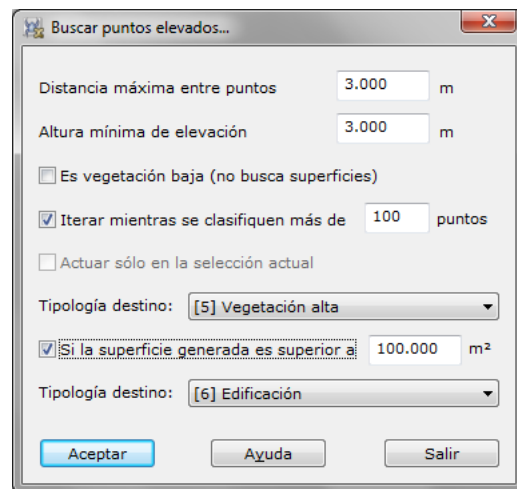


Figura 453: Cuadro de diálogo Buscar puntos elevados.



- Actuar sólo en la selección actual: Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.
- Tipología destino: Se deberá elegir la tipología de clasificación destino de los puntos que cumplan con las condiciones del cálculo.
- Si la superficie generada es superior a  $x \text{ m}^2$ : Una vez que se ha clasificado un conjunto de puntos, el programa busca la formación de superficies para considerar aquellos puntos que se encuentren en el interior. Si la superficie es superior al valor indicado en este campo se puede cambiar la clasificación e indicar otra clasificación destino.
- Tipología destino: Tipología destino si los puntos forman una superficie de área superior a la indicada en el campo anterior.

El programa comenzará a procesar el archivo actual e irá mostrando los resultados parciales sobre la ventana de Resultados del programa. Si desea Cancelar el proceso el programa le preguntará si desea conservar los cálculos generados hasta ese momento.

## E.2. Buscar puntos aislados

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR que se encuentren aislados, no encontrándose ningún punto cerca de su entorno, normalmente porque estos puntos tienen un valor de cota erróneo.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

- Distancia máxima entre puntos: Distancia máxima para considerar dos puntos como adyacentes o vecinos en el terreno. Este parámetro dependerá de la densidad de puntos. No es adecuado poner un valor demasiado elevado porque ello provocará que se consideren puntos muy alejados del punto en consideración. Si se indica un valor demasiado escaso, no se podrá relacionar el punto en consideración con ningún otro punto.
- Número mínimo de vecinos: Número mínimo de puntos que se tienen que encontrar en el entorno del punto en cuestión para considerar que un punto no es aislado.

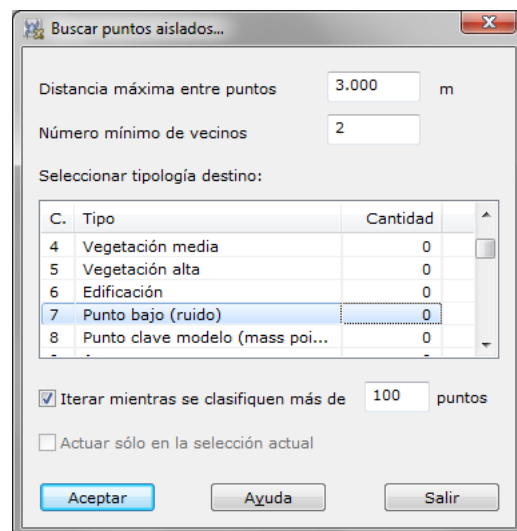


Figura 454: Cuadro de diálogo Buscar puntos aislados.

- Tipología destino: Se deberá elegir la tipología de clasificación destino de los puntos que cumplan con las condiciones del cálculo.
- Iterar mientras se clasifiquen más de x puntos: El proceso de clasificación puede mejorar si se realizan iteraciones. Por ello, se puede indicar una cantidad mínima de puntos por encima de la cual el programa automáticamente repite el proceso. Por tanto, estas iteraciones se detendrán cuando no se clasifiquen más puntos de los indicados en este campo.
- Actuar sólo en la selección actual: Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.

El programa comenzará a procesar el archivo actual e irá mostrando los resultados parciales sobre la ventana de Resultados del programa. Si desea Cancelar el proceso el programa le preguntará si desea conservar los cálculos generados hasta ese momento.

### E.3. Buscar puntos aéreos

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR que tienen una cota mucho más elevada que los puntos de su entorno, normalmente porque el valor de esta cota es erróneo.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

- Radio de búsqueda de puntos vecinos: Distancia máxima para considerar que un punto está en el entorno del punto en cuestión. Este parámetro dependerá de la densidad de puntos. El conjunto de puntos que queden en este entorno influirán en el cálculo del valor de cota apropiado.
- Diferencia con respecto desviación típica: Este valor indica la diferencia que tiene que existir en la desviación típica base unidad respecto de la desviación típica del conjunto de puntos que se han encontrado en su entorno. Es decir, la diferencia que existe entre la cota y el valor medio deberá ser tantas veces mayor que la media de las diferencias del conjunto.
- Tipología destino: Se deberá elegir la tipología de clasificación destino de los puntos que cumplan con las condiciones del cálculo.

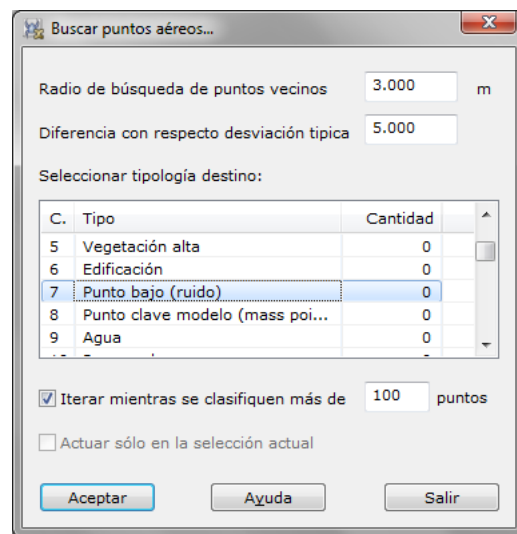


Figura 455: Cuadro de diálogo Buscar puntos aéreos.

- Iterar mientras se clasifiquen más de x puntos: El proceso de clasificación puede mejorar si se realizan iteraciones. Por ello, se puede indicar una cantidad mínima de puntos por encima de la cual el programa automáticamente repite el proceso. Por tanto, estas iteraciones se detendrán cuando no se clasifiquen más puntos de los indicados en este campo.
- Actuar sólo en la selección actual: Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.

El programa comenzará a procesar el archivo actual e irá mostrando los resultados parciales sobre la ventana de Resultados del programa. Si desea Cancelar el proceso el programa le preguntará si desea conservar los cálculos generados hasta ese momento.

## E.4. Buscar puntos hundidos

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR que tienen una cota mucho más baja que los puntos de su entorno, normalmente porque el valor de esta cota es erróneo.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

- Radio de búsqueda de puntos vecinos: Distancia máxima para considerar que un punto está en el entorno del punto en cuestión. Este parámetro dependerá de la densidad de puntos. El conjunto de puntos que queden en este entorno influirán en el cálculo del valor de cota apropiado.
- Diferencia con respecto desviación típica: Este valor indica la diferencia que tiene que existir en la desviación típica base unidad respecto de la desviación típica del conjunto de puntos que se han encontrado en su entorno. Es decir, la diferencia que existe entre la cota y el valor medio deberá ser tantas veces mayor que la media de las diferencias del conjunto.
- Tipología destino: Se deberá elegir la tipología de clasificación destino de los puntos que cumplan con las condiciones del cálculo.
- Iterar mientras se clasifiquen más de x puntos: El proceso de clasificación puede mejorar si se realizan iteraciones. Por ello, se puede indicar una cantidad mínima de puntos por encima de la cual el programa automáticamente repite el proceso.

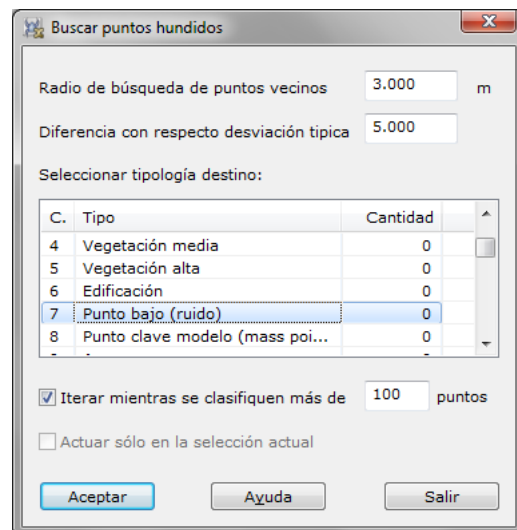


Figura 456: Cuadro de diálogo Buscar puntos hundidos.

Por tanto, estas iteraciones se detendrán cuando no se clasifiquen más puntos de los indicados en este campo.

- Actuar sólo en la selección actual: Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.

El programa comenzará a procesar el archivo actual e irá mostrando los resultados parciales sobre la ventana de Resultados del programa. Si desea Cancelar el proceso el programa le preguntará si desea conservar los cálculos generados hasta ese momento.

## E.5. Buscar puntos por diferencia de intensidad

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR en función de las diferencias entre los valores de intensidad que un punto tiene con su entorno.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

- Distancia máxima entre puntos: Distancia máxima para considerar dos puntos como adyacentes o vecinos en el terreno. Este parámetro dependerá de la densidad de puntos. No es adecuado poner un valor demasiado elevado porque ello provocará que se consideren puntos muy alejados del punto en consideración. Si se indica un valor demasiado escaso, no se podrá relacionar el punto en consideración con ningún otro punto.
- Diferencia de intensidad: Diferencia que debe existir entre un punto y su entorno para clasificar el punto. Este valor considera el signo.
- Iterar mientras se clasifiquen más de x puntos: El proceso de clasificación puede mejorar si se realizan iteraciones. Por ello, se puede indicar una cantidad mínima de puntos por encima de la cual el programa automáticamente repite el proceso. Por tanto, estas iteraciones se detendrán cuando no se clasifiquen más puntos de los indicados en este campo.
- Actuar sólo en la selección actual: Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.
- Tipología destino: Se deberá elegir la tipología de clasificación destino de los puntos que cumplan con las condiciones del cálculo.

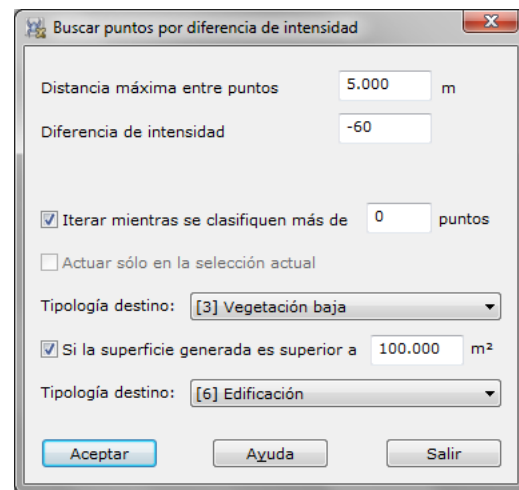


Figura 457: Cuadro de diálogo Buscar puntos por diferencia de intensidad.

- Si la superficie generada es superior a  $x \text{ m}^2$ : Una vez que se ha clasificado un conjunto de puntos, el programa busca la formación de superficies para considerar aquellos puntos que se encuentren en el interior. Si la superficie es superior al valor indicado en este campo se puede cambiar la clasificación e indicar otra clasificación destino.
- Tipología destino: Tipología destino si los puntos forman una superficie de área superior a la indicada en el campo anterior.

El programa comenzará a procesar el archivo actual e irá mostrando los resultados parciales sobre la ventana de Resultados del programa. Si desea Cancelar el proceso el programa le preguntará si desea conservar los cálculos generados hasta ese momento.

## E.6. Buscar puntos según línea de vuelo

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR en función de las propiedades geométricas que un punto tiene con los puntos registrados antes o después en el vuelo. Para clasificar, la herramienta precisa de unas diferencias de altitud que se deberán indicar de mayor a menor según los campos que a continuación se explican.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

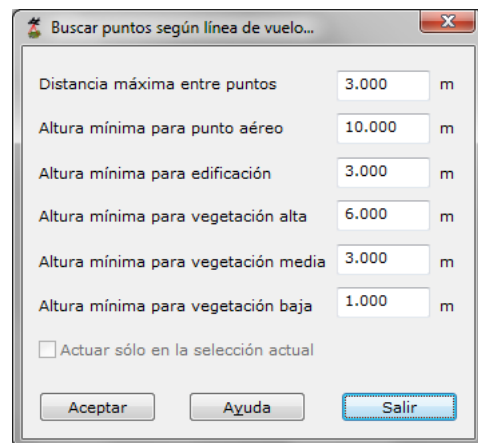


Figura 458: Cuadro de diálogo Buscar puntos según línea de vuelo.

- Distancia máxima entre puntos: Distancia máxima para considerar dos puntos como adyacentes o vecinos en el terreno. Este parámetro dependerá de la densidad de puntos. No es adecuado poner un valor demasiado elevado porque ello provocará que se consideren puntos muy alejados del punto en consideración. Si se indica un valor demasiado escaso, no se podrá relacionar el punto en consideración con ningún otro punto.
- Altura mínima para punto aéreo: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se considere como un punto aéreo.
- Altura mínima para edificación: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se considere como un punto de edificación.
- Altura mínima para vegetación alta: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se considere como un punto de vegetación alta.

- Altura mínima para vegetación media: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se considere como un punto de vegetación media.
- Altura mínima para vegetación baja: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se considere como un punto de vegetación baja.
- Actuar sólo en la selección actual: Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.

El programa comenzará a procesar el archivo actual e irá mostrando los resultados parciales sobre la ventana de Resultados del programa. Si desea Cancelar el proceso el programa le preguntará si desea conservar los cálculos generados hasta ese momento.

## E.7. Buscar puntos según geometría más RGB

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR en función de las propiedades geométricas que un punto tiene con su entorno más el valor del color que tenga asignado. De esta forma, se puede particularizar sobre ciertos objetos que han tenido una determinada respuesta radiométrica. No todos los archivos LiDAR tienen color registrado en sus puntos. Si no fuera así, se podría asignar en un proceso posterior. Consulte la herramienta Asignar color RGB a puntos para más información de cómo añadir RGB al archivo.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

- Lista de condiciones: Se deberán añadir las condiciones que deben cumplir los puntos para ser clasificados. Estas condiciones serán composición de un color (según sus componentes RGB) y un valor mínimo de altura respecto a su entorno. Cada condición añadida podrá tener una tipología destino diferente. Utilice para ello los botones Añadir, Editar o Borrar.
- Distancia máxima entre puntos: Distancia máxima para considerar dos puntos como adyacentes o vecinos en el terreno. Este parámetro dependerá de la densidad de puntos. No es adecuado poner un valor demasiado elevado porque ello provocará que se consideren puntos muy alejados del punto en consideración. Si se indica un valor demasiado escaso, no se podrá relacionar el punto en consideración con ningún otro punto.
- Iterar mientras se clasifiquen más de x puntos: El proceso de clasificación puede mejorar si se realizan iteraciones. Por ello, se puede indicar una cantidad mínima de puntos por encima de la cual el programa automáticamente repite el proceso. Por tanto, estas iteraciones se detendrán cuando no se clasifiquen más puntos de los indicados en este campo.



- Actuar sólo en la selección actual: Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.

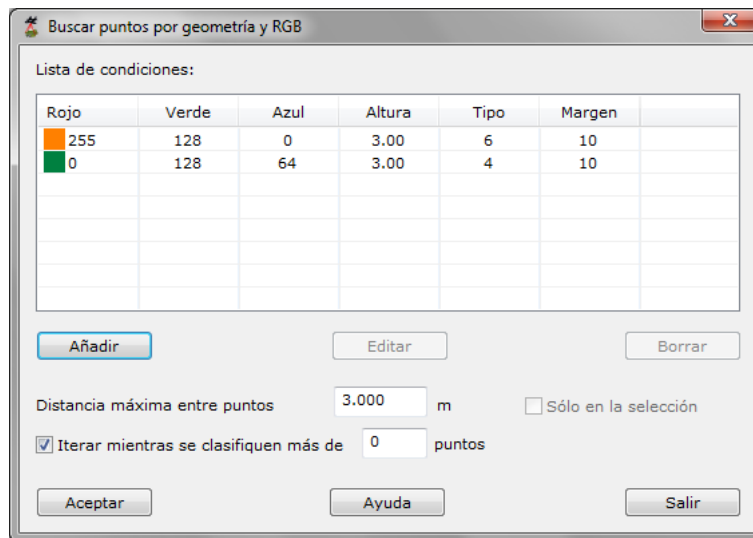


Figura 459: Cuadro de diálogo Buscar puntos según geometría más RGB.

El programa comenzará a procesar el archivo actual e irá mostrando los resultados parciales sobre la ventana de Resultados del programa. Si desea Cancelar el proceso el programa le preguntará si desea conservar los cálculos generados hasta ese momento.

## E.8. Buscar puntos según geometría más intensidad

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR en función de las propiedades geométricas que un punto tiene con su entorno más el valor de la intensidad que tenga asignado. De esta forma, se puede particularizar sobre ciertos objetos que han tenido una determinada respuesta al láser.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

- Lista de condiciones: Se deberán añadir las condiciones que deben cumplir los puntos para ser clasificados. Estas condiciones serán composición de un rango de intensidad (definido por un mínimo y un máximo) y un valor mínimo de altura respecto a su entorno. Cada condición añadida podrá tener una tipología destino diferente. Utilice para ello los botones Añadir, Editar o Borrar.
- Distancia máxima entre puntos: Distancia máxima para considerar dos puntos como adyacentes o vecinos en el terreno. Este parámetro dependerá de la densidad de puntos. No es adecuado poner un valor demasiado elevado porque ello provocará que se consideren puntos muy alejados del punto en consideración. Si se indica un valor demasiado escaso, no se podrá relacionar el punto en consideración con ningún otro punto.

- Iterar mientras se clasifiquen más de x puntos: El proceso de clasificación puede mejorar si se realizan iteraciones. Por ello, se puede indicar una cantidad mínima de puntos por encima de la cual el programa automáticamente repite el proceso. Por tanto, estas iteraciones se detendrán cuando no se clasifiquen más puntos de los indicados en este campo.
- Actuar sólo en la selección actual: Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.

Mínimo	Máximo	Altura	Tipo
0	30	2.00	4
30	60	3.00	5
100	200	6.00	6

Añadir      Editar      Borrar

Distancia máxima entre puntos: 5.000 m      ☐ Sólo en la selección

☒ Iterar mientras se clasifiquen más de 0 puntos

Aceptar      Ayuda      Salir

Figura 460: Cuadro de diálogo Buscar puntos según geometría más intensidad.

El programa comenzará a procesar el archivo actual e irá mostrando los resultados parciales sobre la ventana de Resultados del programa. Si desea Cancelar el proceso el programa le preguntará si desea conservar los cálculos generados hasta ese momento.

## E.9. Buscar puntos en Superficies Planas

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR que estén situados en superficies planas con una inclinación máxima y una superficie mínima. Es decir, es muy indicada para la búsqueda de puntos que se han medido sobre las cubiertas de los edificios. Antes de ejecutar esta herramienta es recomendable que se clasifiquen los puntos elevados utilizando alguna de las herramientas disponibles al efecto. Con esto se consigue aislar los puntos que tienen una determinada altura y que pueden pertenecer a edificaciones. En los parámetros que se solicitan en el cuadro de diálogo, se deberá seleccionar sólo aquellos puntos que previamente fueron clasificados por ser elevados. Con esto, se evita clasificar puntos que forman superficies planas pero están en el suelo.

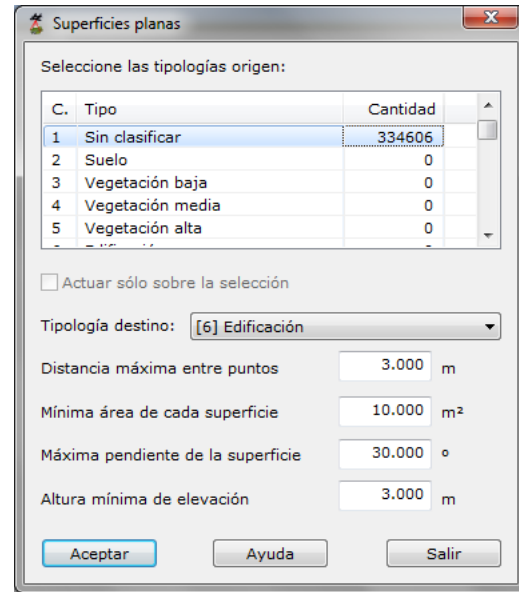


Figura 461: Cuadro de diálogo Buscar puntos en Superficies Planas.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

- **Seleccione las tipologías origen:** Se deberán seleccionar las tipologías origen donde buscar los puntos que forman la superficie.
- **Actuar sólo en la selección actual:** Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.
- **Tipología destino:** Se deberá elegir la tipología de clasificación destino de los puntos que cumplan con las condiciones del cálculo.
- **Distancia máxima entre puntos:** Distancia máxima para considerar dos puntos como adyacentes o vecinos en el terreno. Este parámetro dependerá de la densidad de puntos. No es adecuado poner un valor demasiado elevado porque ello provocará que se consideren puntos muy alejados del punto en consideración. Si se indica un valor demasiado escaso, no se podrá relacionar el punto en consideración con ningún otro punto.
- **Mínima área de cada superficie:** Valor que deberá superar el conjunto de puntos vecinos que cumplen con la condición de ser superficie plana.
- **Máxima pendiente de la superficie:** Valor máximo en grados sexagesimales que no deberá superar la superficie que forman los puntos.

- Altura mínima de elevación: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se cambie su clasificación.

## E.10. Buscar puntos en Paredes

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR que estén situados en superficies verticales, como pueden ser las fachadas de los edificios. Estos puntos suelen ser “no deseados” por lo que se pueden clasificar según alguna tipología accesoria y luego ser eliminados.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

- Seleccione las tipologías origen: Se deberán seleccionar las tipologías origen donde buscar los puntos situados en paredes.
- Actuar sólo en la selección actual: Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.
- Tipología destino: Se deberá elegir la tipología de clasificación destino de los puntos que cumplan con las condiciones del cálculo.
- Distancia máxima entre puntos: Distancia máxima para considerar que los puntos están situados en la misma vertical. No conviene dar un valor muy alto. Se recomienda dar un valor cercano a la precisión planimétrica que pueda tener el LiDAR. Al contrario que en el resto de herramientas, este valor no se corresponde con la densidad de puntos tomados.
- Mínimo número de puntos: Cantidad mínima de puntos encontrados sobre la misma vertical para considerar que es una fachada.
- Altura mínima de elevación: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se cambie su clasificación.

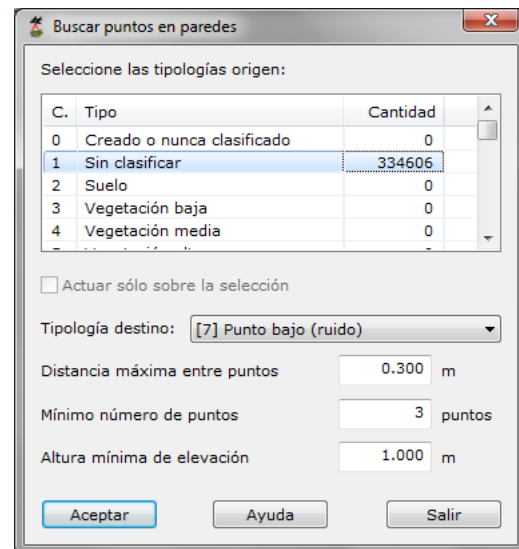


Figura 462: Cuadro de diálogo Buscar puntos en Paredes.

## E.11. Superficie mágica

Esta herramienta está destinada a la búsqueda y clasificación de puntos LiDAR en función de forma automática. La herramienta utilizará diversos métodos de clasificación para generar un archivo totalmente clasificado, apareciendo puntos de edificación, vegetación, suelo, solapados, hundidos, elevados y ruido. Para clasificar, la herramienta precisa de unas diferencias de altitud que se deberán indicar de mayor a menor según los campos que a continuación se explican.



Figura 463: Cuadro de diálogo Superficie mágica.

Los parámetros que precisa son los siguientes:

- Distancia máxima entre puntos: Distancia máxima para considerar dos puntos como adyacentes o vecinos en el terreno. Este parámetro dependerá de la densidad de puntos. No es adecuado poner un valor demasiado elevado porque ello provocará que se consideren puntos muy alejados del punto en consideración. Si se indica un valor demasiado escaso, no se podrá relacionar el punto en consideración con ningún otro punto.
- Altura mínima para punto aéreo: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se considere como un punto aéreo.
- Altura mínima para edificación: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se considere como un punto de edificación. Si se indica un valor 0, no se buscarán edificaciones.
- Altura mínima para vegetación alta: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se considere como un punto de vegetación alta.
- Altura mínima para vegetación media: Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se considere como un punto de vegetación media.

- **Altura mínima para vegetación baja:** Altura mínima que tiene que existir entre el punto en consideración con respecto a alguno de sus vecinos para que se considere como un punto de vegetación baja.
- **Suavizar perfiles:** Se podrá activar esta opción si se desean ajustar los puntos registrados utilizando B-Splines en los perfiles, de tal forma que se pueden corregir pequeños errores de registro.
- **Actuar sólo en la selección actual:** Se podrá activar esta opción para calcular sólo en los puntos que actualmente se tengan seleccionados.
- **Utilizar intensidad:** Se podrá activar esta opción para utilizar el parámetro intensidad en la identificación de vegetación, considerando esta como aquellos puntos que tengan un intensidad que no supere el valor indicado en el campo Máxima intensidad para vegetación.
- **Mínima área para edificaciones:** Si se desean buscar edificaciones, se podrá indicar un valor de área mínima que deberán formar los puntos vecinos clasificados como tal.
- **Máxima pendiente para edificaciones:** Valor máximo de pendiente en grados sexagesimales que deberán tener las superficies formadas por los puntos considerados como edificación.
- **Máximo desnivel para edificaciones:** Máximo diferencia en cota que deberán tener los puntos que conforman el límite de edificación.

El programa comenzará a procesar el archivo actual e irá mostrando los resultados parciales sobre la ventana de Resultados del programa. Si desea Cancelar el proceso el programa le preguntará si desea conservar los cálculos generados hasta ese momento.

## E.12. Orientación Midiendo Puntos

Esta herramienta está destinada a la orientación de una imagen raster midiendo puntos sobre ella y sobre un documento vectorial. Este documento deberá haber sido cargado previamente como referencia.

Los parámetros y campos que se muestran son los siguientes:

- **Lista de puntos:** En este espacio se mostrarán los puntos que se van midiendo. Por cada punto se mostrará el número secuencial de punto, coordenadas foto, coordenadas terreno y residuos de cada coordenada. Se deberá ir añadiendo cada punto, seleccionando la posición con el botón izquierdo del ratón sobre cada ventana (a la izquierda está la ventana con la imagen y a la derecha la ventana con el documento de referencia vectorial). Es indiferente el orden de selección en cada



ventana. Una vez introducido cada punto, estos pueden ser eliminados o remedidos (según los residuos que van generando en tiempo real) utilizando los botones Borrar y Remedir, respectivamente. Según se van introduciendo puntos, el programa va calculando la transformación más apropiada y generando los residuos. Los parámetros y tipo de transformación se muestran en la parte inferior del cuadro de diálogo. Por último, también es posible salvar o cargar los puntos desde disco, utilizando los botones Salvar puntos y Cargar puntos, respectivamente.

- Archivo de resultados: Cuando se termine la medición de los puntos, el programa permite salvar los resultados en un archivo de texto. Para ello, seleccione la casilla a la izquierda de este campo e indique un nombre de archivo o seleccione uno con el explorador de Windows que se muestra pulsando el botón que aparece a la derecha.
- Residuos: Se podrá seleccionar si se desean mostrar los residuos en coordenadas imagen o terreno.
- Tipo: En este campo se podrá seleccionar el tipo de transformación que el programa utilizará en el cálculo. Si se elige la opción Auto, el programa seleccionará la transformación más adecuada para los puntos medidos.

Según se van midiendo puntos, el programa calculará la transformación en tiempo real e irá mostrando los parámetros de ésta en la parte inferior del cuadro de diálogo. Estos parámetros serán variables en función de la transformación utilizada.

Número	XFoto	YFoto	XTerr...	YTerr...	ZTerr...	Resid...	Resid...	Res...
1	306.3	1529.6	9.81	44.66	17.17	1.08	-3.16	0.00
2	748.0	1536.9	11.62	36.04	17.21	-6.03	2.03	0.00
3	3001.5	1603.6	20.22	-5.59	17.28	-1.17	-1.36	0.00
4	2510.7	1582.7	18.40	2.87	17.22	8.21	6.06	0.00

Remedir Borrar Salvar puntos Cargar puntos

Archivo de resultados  
☒ Orientacion.txt

Residuos  
☒ Imagen ☐ Terreno

Tipo  
Auto Cónica

Centro de proyección  
X0 -11.081 ± 0.498 m  
Y0 12.604 ± 0.171 m  
Z0 -0.121 ± 0.222 m

Rotaciones  
Giro en X 135.8988 ± 0.8199 °  
Giro en Y -69.7424 ± 0.3585 °  
Giro en Z 44.1044 ± 0.0470 °

Orientación interna  
X P Prin 1613.973 ± 9.867 px  
Y P Prin 1033.498 ± 7.992 px  
Focal 1598.664 ± 31.236 px

Desviación estándar 3.192 px

Aceptar Ayuda Salir

Figura 464: Cuadro de diálogo Orientación midiendo puntos.

# Referencias

## F.1. Glosario de términos y acrónimos

- 2D: Acrónimo de Dos Dimensiones. Posición en el plano caracterizado por las coordenadas X e Y.
- 3D: Acrónimo de Tres Dimensiones. Posición en el espacio caracterizado por las coordenadas X, Y y Z.
- ALB: Acrónimo de Airborne Laser Bathymetry.
- ALH: Acrónimo de Airborne Laser Hydrography.
- ALS: Acrónimo de Airborne Laser Scanning o Escáner Láser Aerotransportado.
- Array: Matriz o vector de elementos, normalmente digitales, almacenados de manera continua. Se suele hablar de array unidimensional o bidimensional, donde los elementos están dispuestos en filas y columnas.
- ASTER: Acrónimo de Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.
- BD: Acrónimo de Base de Datos.
- Beidou: Big Dipper en inglés u Osa Mayor en chino. Sistema GNSS de la R.P. China.
- CAD: Acrónimo de Computer Aided Design o Diseño Asistido por Ordenador.
- Caché: Parte pequeña de la memoria o del disco de un ordenador de gran velocidad de acceso donde se copian los datos de la memoria principal a los que se accede más habitualmente para mejorar el rendimiento del ordenador.
- CCD: Acrónimo de Charge-Coupled Device, en español Dispositivo de Carga Acoplada. Es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados, populares por su uso en cámaras digitales.
- CHM: Acrónimo de Canopy Height Model, en referencia al modelo digital de las alturas alcanzadas por la masa forestal.

- CIPA: Acrónimo de Comité International de Photogrammétrie Architecturale. Su nombre actual es CIPA Heritage Documentation y es una organización que se encarga de la transferencia de tecnología entre las ciencias de medida y visualización a las disciplinas de registro del patrimonio cultural. Pertenece a ICOMOS y fue fundada en 1968 junto con la ISPRS.
- CMOS: Acrónimo de Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, empleado en la construcción de circuitos integrados, incluyendo cámaras digitales. Estos circuitos son más baratos que los CCD aunque su velocidad es inferior. Son menos sensibles a la luz y consumen menos energía, pero las imágenes tienen más ruido.
- CMP: Acrónimo de Continuos MultiPulse, tecnología de los sensores LiDAR de Optech para registrar varios pulsos simultáneamente.
- CRP: Acrónimo de Close-Range Photogrammetry, en referencia a la Fotogrametría de Objeto Cercano.
- CW: Acrónimo de Continuos Wave, haciendo referencia a los sensores láser de onda continua o fase.
- DGPS: Acrónimo de Differential Global Positioning System, es decir, posicionamiento GPS en modo diferencial entre una estación fija y otro receptor que recibirá las correcciones.
- Divergencia del haz: Ángulo que muestra la desviación del rayo láser respecto del paralelismo.
- DLR: Acrónimo de Deutsches zentrum für Luft- und Raumfahrt, en español, Centro Aeroespacial Alemán.
- DLT: Acrónimo de Direct Linear Transformation.
- DSLR: Acrónimo de Digital Single Lens Reflex, es decir, cámara réflex digital.
- DRSM: Acrónimo de Digital Road Surface Model, es decir, modelo digital de la superficie de la vía.
- Eco: Número de pulsos reflejados, recibidos y grabados para cada pulso láser enviado. También denominado pulso.
- ED-50: Acrónimo de European Datum de 1950, haciendo referencia al sistema de referencia adoptado para la zona europea en 1950. Está basado en el elipsoide internacional de Hayford.
- EGM2008: Acrónimo de Earth Gravitational Model de 2008, modelo gravitacional mundial de 2008 calculado por la NGA.

- ETRS-89: Acrónimo de European Terrestrial Reference System 1989, es decir, Sistema de Referencia Terrestre Europeo recomendado por la Unión Europea para la georreferenciación de datos en Europa. Está basado en el elipsoide GRS-80.
- Exactitud: Es la capacidad de un instrumento de ofrecer un valor de medición próximo al valor real. También denominada error medio cuadrático (EMC). El valor real teóricamente es desconocido, por lo que suele utilizarse valores que provienen de un equipo de mayor calidad. Si  $\varepsilon$  es el error o diferencia de una medición respecto de su valor real y  $n$  es el número de mediciones, se puede expresar la exactitud como:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}$$



Figura 465: Equipo exacto pero de baja precisión.

- FMC: Acrónimo de Forward Motion Compensation, referido a la compensación a aplicar en las imágenes digitales tomadas desde un avión o satélite en movimiento.
- FOV: Acrónimo de Field Of View, es decir, Campo de Visión. Es el ángulo de escaneo que el rayo láser que puede cubrir mientras avanza el avión.
- FPS: Acrónimo de Frames Per Second, es decir, Fotogramas por Segundo.
- GCP: Acrónimo de Ground Control Point, es decir, Punto de Control en el Terreno utilizado para georreferenciar imágenes fotogramétricas o de teledetección.
- GNSS: Acrónimo de Global Navigation Satellite System.
- GPS: Acrónimo de Global Position System perteneciente al gobierno de EE.UU.
- GSD: Acrónimo de Ground Sample Distance, referido a la resolución de una imagen digital. Es la distancia entre los centros de dos píxeles vecinos medidos en el suelo.
- HALE: Acrónimo de High Altitude Long Endurance.
- Hilo de ejecución: Unidad de procesamiento que puede ser planificada por un sistema operativo, de tal forma que una aplicación pueda realizar tareas de manera concurrente, es decir, de forma paralela.
- ICOMOS: Acrónimo de International Council On MONuments and Sites, organización profesional que trabaja para la conservación y protección del patrimonio cultural mundial.
- ICP: Acrónimo de Iterative Closest Point, en referencia al algoritmo de búsqueda de puntos homólogos en grandes nubes de puntos.
- IFOV: Acrónimo de Instantaneous Field of View o ángulo de divergencia del láser.

- IMU: Acrónimo de Inertial Measurement Unit. Se puede considerar el núcleo de un INS.
- INS: Acrónimo de Inertial Navigation System.
- InSAR: Acrónimo de Interferometric Synthetic Aperture Radar.
- ISPRS: Acrónimo de International Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
- ISRO: Acrónimo de Indian Space Research Organization.
- JAXA: Acrónimo de Japan Aerospace eXploration Agency.
- Krigeado o Kriging: Método de interpolación geoestadística inventado por D.G. Krige que, utilizando un variograma, estima puntos suponiendo que la variación espacial sigue con el mismo patrón.
- Ladar: Acrónimo de Laser radar o LAser Detection And Ranging.
- Láser: Acrónimo de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
- LiDAR: Acrónimo de LIght Detection And Ranging.
- Línea base: Vector tridimensional definido por la posición de dos receptores GNSS.
- LQE: Acrónimo de Linear Quadratic Estimation. Es otro modo de denominar al filtro de Kalman.
- MDT: Acrónimo de Modelo Digital del Terreno.
- MDS: Acrónimo de Modelo Digital de Superficies.
- MDE: Acrónimo de Modelo Digital de Elevaciones.
- MLS: Acrónimo de Mobile Laser scanning Systems.
- MMS: Acrónimo de Mobile Mapping System haciendo referencia a los sistemas de registro láser y fotográfico montados sobre vehículos, normalmente automóviles.
- Modelar: Búsqueda de algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.
- MPiA: Acrónimo de Multiple Pulses in Air, tecnología de los sensores LiDAR de Leica para registrar varios pulsos simultáneamente.
- MTA: Acrónimo de Multi-Time-Around, tecnología de los sensores LiDAR de Riegl para registrar varios pulsos simultáneamente.

- Multihilo: En ingles multithreading, es la capacidad de un sistema operativo para ejecutar eficientemente múltiples hilos de ejecución.
- NASA: Acrónimo de National Aeronautics and Space Administration, organismo encargado de los temas relacionado con el espacio perteneciente a los EE.UU.
- NAVSTAR: Acrónimo de NAVigation System And Ranging y que representa el conjunto de satélites GPS de EE.UU.
- NGA: Acrónimo de National Geospatial-Intelligence Agency de EE.UU.
- NIR: Acrónimo de Near InfraRed o Infrarrojo Cercano.
- NOAA: Acrónimo de National Oceanic and Atmospheric Administration.
- NSPO: Acrónimo de National Space Organization de Taiwan.
- NURBS: Acrónimo de Non-Uniform Rational B-Splines, en referencia a un tipo especial de superficies basadas en splines. Siendo  $X_i$  los puntos de control y  $b_i$  las funciones base, la forma general es:

$$\begin{pmatrix} x(u,v) \\ y(u,v) \\ z(u,v) \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^L b_i(u,v) X_i \quad X_i \in \mathbb{R}^3$$

- Octree: Ver Quadtree.
- ORFEO: Acrónimo de Optical and Radar Federated Earth Observation, programa satelital conjunto entre Francia e Italia.
- Ortofotografía u ortoimagen: Imagen de una zona u objeto, en la que todos los elementos presentan la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico, obtenida a partir de un conjunto de imágenes que han sido corregidas de los efectos de perspectiva (normalmente cónica).
- OTF: Acrónimo de On The Fly, en referencia a aquellos datos que son obtenidos en el momento de la toma.
- PALSAR: Acrónimo de Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar, es decir, sensor SAR que captura en la banda L.
- Pancromático: Imagen o película en blanco y negro.
- Pan-sharpening: Proceso para fusionar una imagen pancromática de alta resolución y una imagen multispectral de baja resolución para crear una imagen en color de alta resolución.



- Píxel: Acrónimo de Picture Element o mínima división de una imagen.
- Precisión: Es la capacidad de un instrumento de ofrecer el mismo resultado de medición en condiciones similares. Mide el grado de dispersión de un conjunto de valores medidos con respecto a la media. También denominada desviación estándar o típica. Si  $v$  es el residuo o diferencia de una medición respecto del valor más probable y  $n$  es el número de mediciones, se puede expresar la precisión como:

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$



Figura 466: Equipo preciso pero de baja exactitud.

- POLSAR: Acrónimo de POLarimetría SAR.
- POS: Acrónimo de Position and Orientation System o Sistema de Posición y Orientación dinámico.
- PRF: Acrónimo de Pulse Repetition Frequency. Es la frecuencia del pulso, es decir, el número de pulsos láser enviados por segundo.
- Pseudodistancia: Es la distancia entre un satélite y un receptor GNSS. Esta distancia se obtiene multiplicando la velocidad de la luz por el tiempo que ha viajado la señal. El término pseudo es debido a la gran variedad de errores que afectan a la medida del tiempo utilizada en el cálculo, por lo que no se puede considerar una distancia precisa.
- Quadtree: Forma de estructurar la información de tal manera que los datos se van descomponiendo en zonas recursivamente: Inicialmente se tiene un espacio donde se va almacenando la información; llegado a una determinada cantidad, este espacio se subdivide en cuatro asignando a cada cuadrante la información correspondiente. Esta subdivisión se realiza en el plano XY, pero existe la versión tridimensional denominada Octree.
- Radar: Acrónimo de RAdio Detection And Ranging.
- RAR: Acrónimo de Radar de Apertura Real.
- REDNAP: Acrónimo de Red de Nivelación de Alta Precisión. Es una red altimétrica distribuida en España, realizada entre 2000 y 2008, constituida por 25 mil señales que configuran un mallado de 18 mil km.
- Reflexividad: Fracción de radiación incidente reflejada por una superficie:

$$\rho(\lambda) = \frac{G_{\text{reflejada}}(\lambda)}{G_{\text{incidente}}(\lambda)}$$

Donde  $G_{\text{reflejada}}(\lambda)$  y  $G_{\text{incidente}}(\lambda)$  son las intensidades espectrales reflejadas e incidentes (por longitud de onda) respectivamente.

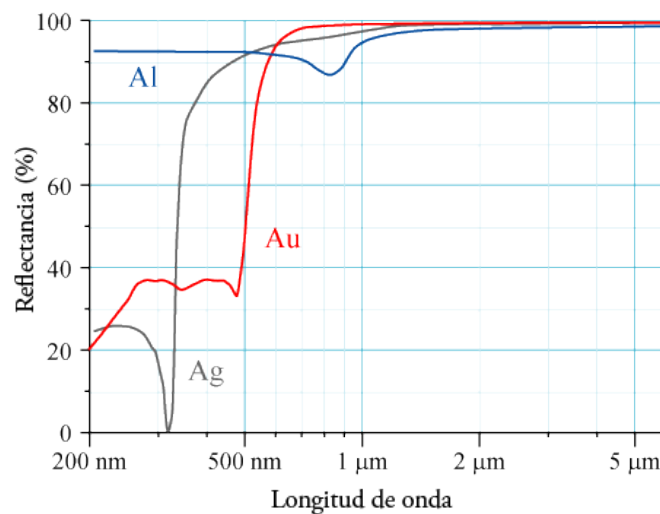


Figura 467: Curvas de reflexividad según longitud de onda para rayos que inciden perpendicularmente sobre espejos metálicos de aluminio (Al), plata (Ag), y oro (Au). Fuente: wikipedia.es.

- REGENTE: Acrónimo de RED GEodésica Nacional por Técnica Espaciales del IGN, constituida por 1200 puntos distribuidos por la península y Baleares. Las coordenadas de sus vértices están calculadas en el sistema ED-50 y ETRS-89.
- RIM: Acrónimo de Range IMaging, en referencia a sensores integrados de medición de distancias e imagen.
- RPC: Acrónimo de Rational Polynomial Coefficients o también Rational Polynomial Camera model. Son modelos matemáticos empíricos que relacionan el espacio imagen (fila y columna) con latitud, longitud y elevación. Se expresan como la relación de dos polinomios cúbicos, uno para las filas y otro para las columnas. Los coeficientes de estos polinomios son calculados por las empresas propietarias de los satélites a partir de la posición en la órbita, orientación y el modelo físico del sensor.
- SAR: Acrónimo de Synthetic Aperture Radar, es decir, radar de apertura sintética.
- ScaLARS: Acrónimo de Scanning Laser Altitude and Reflectance Sensor, sensor aéreo basado en medida de fase desarrollado por la Universidad de Stuttgart.
- Scan rate: Velocidad de lectura láser, es decir, número de patrones (o líneas) analizados por segundo.
- Secchi, disco de: instrumento de medición de la penetración luminosa, y por ello de la turbidez en masas de agua como ríos, lagos y mares. Para calcular la profundidad de Secchi, se sumerge y se anota la profundidad que alcanza el disco cuando este se pierde de vista desde la superficie del agua. Tiene forma circular, dividido en cuatro cuadrantes que se pintan de blanco y negro alternativamente.
- Separación vertical mínima de objeto: Distancia mínima entre dos ecos láser diferentes.

- SHOALS: Acrónimo de Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey System.
- SIG: Acrónimo de Sistema de Información Geográfica.
- SLR: Acrónimo de Satellite Laser Ranging, sistema geodésico de medida de distancias a satélites reflectores mediante láser.
- SNR: Acrónimo de Signal Noise Ratio, relativo a la relación entre el ruido y la señal recibida por un sensor activo.
- Sonar: Acrónimo de SOund Navigation And Ranging, es decir, navegación por sonido. Es una técnica que usa la propagación del sonido bajo el agua (principalmente) para navegar, comunicarse o detectar objetos sumergidos. Su funcionamiento es similar al radar.
- SPiA: Acrónimo de Single Pulse in Air.
- SRTM: Acrónimo de Shuttle Radar Topography Mission.
- SSD: Acrónimo de Solid-State Drive, es decir, unidad de estado sólido que es un dispositivo de almacenamiento de datos que usa una memoria no volátil, como la memoria flash, o una memoria volátil como la SDRAM, para almacenar datos.
- TDI: Acrónimo de Time Delayed Integration, sistema para corregir la velocidad de movimiento del avión o satélite y poder registrar imágenes con gran precisión.
- TIN: Acrónimo de Triangulated Irregular Network.
- TLS: Acrónimo de Terrestrial Laser Scanning.
- TOF: Acrónimo de Time Of Flight.
- UAV: Acrónimo de Unmanned (o Unpiloted) Aerial Vehicle o Vehículo Aéreo no Tripulado.
- UNESCO: Acrónimo de United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- USGS: Acrónimo de United States Geological Survey.
- UVS Internacional: Acrónimo de Unmanned Vehicle Systems, asociación sin ánimo de lucro que agrupa a los profesionales, investigadores y docentes relacionados con los vehículos no tripulados (aéreos, terrestres y navales).
- Vectorizar: Proceso mediante el cual es posible registrar y representar gráficos en un ordenador utilizando primitivas geométricas tales como puntos, líneas o superficies que están basadas en ecuaciones matemáticas. El gráfico obtenido es complementario a los

gráficos o imágenes raster que se apoyan en la representación mediante matrices donde cada celda representa un píxel.

- Videogrametría: Técnica de determinación de coordenadas tridimensionales a partir de las medidas realizadas sobre dos o más videos digitales tomados desde diferentes ángulos. Estas imágenes puede haber sido tomadas simultáneamente por diferentes cámaras situadas en diferentes puntos de vista o por la misma cámara en movimiento.
- VLBI: Acrónimo de Very Long Baseline Interferometry, es decir, interferometría de línea base muy larga utilizada en Astronomía para medir distancias a cuerpos estelares.
- VTOL: Acrónimo de Vertical Take-Off and Landing, en referencia a los dispositivos de vuelo como helicópteros, cuadrocópteros o multicopteros, que despegan y aterrizan verticalmente.
- WGS84: Acrónimo de World Geodetic System de 1984.

## F.2. Relación de figuras

Todas las figuras de datos geométricos (nubes de puntos LiDAR, cartografía, MDT, MDS o imágenes multiespectrales) han sido realizadas con el software MDTopX, exceptuando aquellas en las que en el título se especifique la aplicación.

Figura 1: Cuadro resumen de tipos de patrimonio (UNESCO, 1972). .....	22
Figura 2: Croquis del yacimiento arqueológico de A Lanzada (Pontevedra) realizada por el CSIC (2010). .....	24
Figura 3: Registro manual de ruinas de construcción sobre un dibujo CAD, .....	25
Figura 4: Dibujo del Monasterio Cisterciense de Carrizo (León). (Ministerio de Cultura, 2010) .....	25
Figura 5: Técnicas de registro tridimensional. ....	26
Figura 6: Levantamiento topográfico de un edificio romano en Wiltshire (Reino Unido). 27	
Figura 7: Levantamiento utilizando técnicas GNSS en Stonehenge (Reino Unido). ....	27
Figura 8: Imagen SAR de la antigua ciudad de Angkor (Camboya) tomada por la NASA. 29	
Figura 9: Gran muralla china registrada con ASTER. ....	29
Figura 10: Magnetograma de las ruinas de Uruk (Iraq). ....	29
Figura 11: Ejemplo de huella arqueológica de asentamiento humano detectada con LiDAR. (English Heritage, 2013). ....	29
Figura 12: Registro mediante escáner láser terrestre de cuevas de valor arqueológico en Nottingham (Reino Unido). ....	30
Figura 13: El espectro electromagnético. ....	38
Figura 14: Cuadro resumen de tipos de sensores. ....	39
Figura 15: Gráfico que relaciona métodos con precisión y tamaño del objeto (Luhmann, et al., 2006). ....	40
Figura 16: Teodolito óptico-mecánico Wild T2. ....	41
Figura 17: Teodolito electrónico Leica TM6100A. ....	42
Figura 18: Distanciómetro Wild Distomat instalado sobre teodolito Wild T2. ....	42
Figura 19: Distanciómetro de mano Leica DISTO. ....	42
Figura 20: Distanciómetro Leica $\mu$ -base con precisiones micrométricas. ....	42
Figura 21: Nivel óptico automático Wild NA2 y mira estadimétrica. ....	43
Figura 22: Nivel digital Leica DNA y mira para lectura óptica y digital. ....	43
Figura 23: Plomada láser cenit/nadir FOIF DZJ200. ....	43
Figura 24: Prisma reflectante de distancias Leica. ....	44
Figura 25: Estación total Trimble S8 de 1" de precisión angular y 2 mm $\pm$ 2 ppm de precisión en distancias. ....	44
Figura 26: Estación total Topcon OS de 1" de precisión angular y 2 mm $\pm$ 2 ppm de precisión en distancias. ....	44

Figura 27: Estación total Leica TDRA 6000 de 0.5" de precisión angular y 1 mm ± 2 ppm de precisión en distancias. ....	44
Figura 28: Ejemplo de nivelación geométrica entre los punto A y E. ....	45
Figura 29: Ejemplo de nivelación trigonométrica entre los punto A y E. ....	46
Figura 30: Radiación desde el polo de radiación O a los puntos A y B. ....	46
Figura 31: Poligonal entre los puntos de coordenadas conocidas A y F, pasando por los puntos incógnita B, C, D y E. ....	46
Figura 32: Intersección directa desde las estaciones A y B al punto incógnita V. ....	47
Figura 33: Intersección inversa en el punto P utilizando las estaciones A, B y C. ....	47
Figura 34: Problema de Hansen para calcular las coordenadas de los puntos M y N a partir de las estaciones A y C. ....	47
Figura 35: Intersección mixta con medidas angulares desde el punto incógnita P y la estación A. ....	48
Figura 36: Intersección mixta con medidas de ángulo y distancia desde el punto P a las estaciones A y B. ....	48
Figura 37: Ejemplo de red topográfica donde se muestran de color negro todas las observaciones que se ha realizado, de color rojo las elipses de incertidumbre planimétrica y de color azul la incertidumbre altimétrica en cada punto. Tanto las elipses como las barras altimétricas están obviamente exageradas. ....	48
Figura 38: Sistema GNSS. ....	49
Figura 39: Satélite GPS. ....	50
Figura 40: Distribución de las estaciones de control de la constelación NAVSTAR. ....	51
Figura 41: Antena GNSS. ....	51
Figura 42: Receptor. ....	51
Figura 43: Terminal. ....	51
Figura 44: Logo NAVSTAR. ....	52
Figura 45: Logo GLONASS. ....	53
Figura 46: Logo Galileo. ....	53
Figura 47: Logo Beidou/Compass. ....	54
Figura 48: Logo QZSS. ....	54
Figura 49: Logo IRNSS. ....	54
Figura 50: Comparación de las órbitas de los diferentes sistemas GNSS. ....	55
Figura 51: Navegador Garmin Montana 650t. ....	56
Figura 52; Navegador TomTom GO. ....	56
Figura 53: Receptor métrico Leica CS25. ....	56
Figura 54: Receptor métrico Trimble Juno 5. ....	56
Figura 55: Receptor sub-métrico Leica Zeno 15. ....	57



Figura 56: Receptor sub-métrico Trimble Geoexplorer 6000. ....	57
Figura 57: Receptor monofrecuencia Leica GMX901. ....	57
Figura 58: Receptores Leica Viva. ....	58
Figura 59: Receptor Trimble R10. ....	58
Figura 60: Receptor Topcon Hiperpro II. ....	58
Figura 61: Leica SmartStation. ....	59
Figura 62: Posición de la antena a partir de las pseudodistancias. ....	59
Figura 63: Buena geometría. GDOP bajo. Satélites distribuidos homogéneamente. ....	59
Figura 64: Concepto de ambigüedades. ....	60
Figura 65: Concepto de línea base. ....	60
Figura 66: Capas atravesadas por la señal. ....	60
Figura 67: Observación GNSS RTK. ....	63
Figura 68: Red de estaciones de referencia GNSS de la Comunidad de Madrid (Comunidad de Madrid, 2013). ....	63
Figura 69: Imagen aérea analógica de 9". ....	68
Figura 70: Gráfico de vuelo. ....	69
Figura 71: Gráfico de distribución de modelos estereoscópicos. ....	69
Figura 72: Ajuste de un bloque fotogramétrico. ....	70
Figura 73: Estación de fotogrametría Digi3D. ....	71
Figura 74: Imágenes tomadas de un edificio desde diferentes puntos de vista para evitar ocultaciones mediante Vexcel UltraCam (Vexcel, 2013). ....	72
Figura 75: Nube de puntos generada por Vexcel UltraMap a partir de imágenes tomadas con UltraCam (Vexcel, 2013). ....	73
Figura 76: Formación de imágenes con sensores CCD lineales. ....	74
Figura 77: Formación de imágenes con sensores CCD de área. ....	74
Figura 78: Tamaños de imagen de la cámara de medio formato antigua Intergraph RMK-D (izquierda), y de las cámaras de gran formato Intergraph DMC-II modelos 140, 230 y 250, respectivamente. ....	74
Figura 79: Leica RCD30 montada en UAV de SwissDrones. ....	75
Figura 80: Trimble DSS 500. ....	75
Figura 81: Trimble Aerial Camera. ....	75
Figura 82: Optech CS-10000. ....	75
Figura 83: Leica RCD30. ....	76
Figura 84: IGI DigiCAM dual en oblicuo. ....	76
Figura 85: IGI IGI DigiCam Quattro. ....	76
Figura 86: Cámara aérea Intergraph DMC-II. ....	76
Figura 87: Leica ADS80 y unidad de control CU80 y almacenamiento MM80. ....	77

Figura 88: Registro con Leica ADS80. ....	77
Figura 89: Microsoft Vexcel UltraCam Eagle. ....	77
Figura 90: Optech CS-15000. ....	77
Figura 91: Wehrli & Geosystem 3-DAS-1. ....	78
Figura 92: Jenoptik JAS 150s. ....	78
Figura 93: Vista del programa Digi3D con información vectorial sobre las imágenes aéreas (Digi21, 2013). ....	79
Figura 94: Geometría del par estereoscópico. ....	81
Figura 95: Identificación de puntos de control sobre dos fotogramas (Topcon, 2013). ....	82
Figura 96: Proyecto con pares estereoscópicos. ....	83
Figura 97: Proyecto con tomas convergentes. ....	83
Figura 98: Cámaras digitales de medio formato. De izquierda a derecha, Mamiya 645, Pentax 645D, Leica S2 y Hasselblad H4D. ....	85
Figura 99: Helicóptero UAV con cámara instalada. ....	86
Figura 100: Gatewing X100 de Trimble. ....	91
Figura 101: Microdrones md4-1000. ....	91
Figura 102: ARCAA Helicopter UAS. ....	91
Figura 103: Aibotix Aibot X6 con cámara térmica. ....	91
Figura 104: Pegasus Mercator. ....	91
Figura 105: Par estereoscópico de imágenes pancromáticas adquiridas con el satélite WorldView-1 con una resolución de 0.5 metros. ....	94
Figura 106: Resolución temporal de IKONOS. ....	95
Figura 107: Resolución espectral de LANDSAT Thematic Mapper y ASTER. ....	95
Figura 108: Satélite Corona. ....	97
Figura 109: Satélite GeoEye-1. ....	97
Figura 110: Satélite IKONOS. ....	97
Figura 111: Satélite SPOT-6. ....	98
Figura 112: Estereoscopía y triestereoscopía con SPOT y Pléiades. ....	98
Figura 113: Satélite QuickBird. ....	98
Figura 114: Satélite WorldView-1. ....	99
Figura 115: Satélite ALOS. ....	99
Figura 116: Satélite CARTOSAT-1. ....	100
Figura 117: Satélite FORMOSAT-2. ....	100
Figura 118: Satélite RadipEye. ....	100
Figura 119: Satélite Terra. ....	100
Figura 120: Satélite radar. ....	103

Figura 121: Satélite SAR. ....	105
Figura 122: Imagen SAR. Se aprecia el fondo marino, corrientes y olas. ....	107
Figura 123: Imagen óptica. Se aprecian bancos de arena y olas internas. ....	107
Figura 124: Imagen TerraSAR-X (3 m, polarizaciones VV, HH, VV+HH), donde la combinación de diferentes polarizaciones realza la diferencia de distintas clases de vegetación. ....	109
Figura 125: En la izquierda se muestra una imagen TerraSAR-X (3 m, polarizaciones VV, HH, VV+HH) y a la derecha una imagen de sensor óptico donde no se notan las diferencias. ....	109
Figura 126: Esquema de registro mediante sensor láser de barrido aerotransportado. ....	115
Figura 127: Registro de puntos mediante láser aerotransportado (ALS). ....	120
Figura 128: Software Leica FPES para el diseño del plan de vuelo. ....	121
Figura 129: Software Leica FCMS para el control del sistema y pilotaje del avión. ....	121
Figura 130: Distribución esquemática de los componentes en el interior del avión. ....	122
Figura 131: Sistema LiDAR Leica ALS60 con cámara digital Leica ADS80 (derecha). ...	122
Figura 132: Leica ALS50 con cámara NexVue. ....	122
Figura 133: Leica ALS50 con cámara Trimble DSS. ....	122
Figura 134: Optech ALTM con cámara Trimble DSS. ....	122
Figura 135: IGI LiteMapper con cámara DigiCAM. ....	122
Figura 136: Ángulo abarcado por el LiDAR. ....	126
Figura 137: Corrección a aplicar a una trayectoria IMU. ....	128
Figura 138: Ejemplo de modelo digital basado en estructura TIN. ....	131
Figura 139: Ejemplo de modelo digital basado en estructura de rejilla. ....	131
Figura 140: Nube de puntos ALS. ....	132
Figura 141: Nube de puntos ALS clasificada en función de los objetos medidos. Cada color indica un tipo de objeto, por ejemplo: naranja es suelo, morado es edificación, verde es vegetación y azul son puntos solapados. ....	133
Figura 142: Nube de puntos ALS clasificada donde sólo se muestran los puntos pertenecientes al suelo. ....	134
Figura 143: Ejemplo de Modelo Digital del Terreno (MDT). ....	135
Figura 144: Ejemplo de Modelo Digital de Superficies (MDS). ....	135
Figura 145: Errores en el modelado provocados por objetos en movimiento. ....	136
Figura 146: Registro de un edificio de dos alturas mediante ALS. Se pueden ver los puntos registrados y el límite calculado para cada cubierta en función de dichos puntos. ....	137
Figura 147: Nube de puntos LiDAR clasificada sobre fotografía aérea georreferenciada más límites de edificación extraídos a partir de estos puntos. ....	138
Figura 148: Errores en el modelo producidos por la indefinición en los bordes de los objetos. ....	138
Figura 149: Centro de generación eléctrica registrado con LiDAR (Optech, 2013). ....	144

Figura 150: Ejemplo de registro en aguas poco profundas y aledaños (Optech, 2013)....	144
Figura 151: Ejemplo de mina a cielo abierto en Río Tinto registrada con LiDAR (Strecha, 2012).....	145
Figura 152: Modelo 3D de ciudad generado a partir de datos LiDAR (Optech, 2013). .	145
Figura 153: Registro mediante LiDAR de un asentamiento arqueológico. En la imagen de la izquierda sólo se aprecian las copas de los árboles. En la imagen de la derecha, se ha generado el MDT después de la clasificación de los puntos, apareciendo la huella de un asentamiento de la Edad de Hierro (English Heritage, 2013).....	146
Figura 154: Pasada de LiDAR batimétrico. ....	147
Figura 155: Geometría de la precisión en la medida ALS. ....	149
Figura 156: Punto medido sobre ladera.....	150
Figura 157: Precisión del sensor Leica ALS70-HP (Leica, 2013).....	151
Figura 158: Principio de operación de un LiDAR terrestre (Riegl VZ-400). ....	153
Figura 159: Corte mostrando la construcción del Leica ScanStation C10 (Leica, 2013). .	154
Figura 160: Proyecto de registro mediante TLS. En gabinete, se tendrá que proceder a la unión de las diferentes nubes de puntos. ....	155
Figura 161: Diferentes modelos de señales de puntería o dianas y accesorios para fijarlas y orientarlas. ....	156
Figura 162: Posible distribución de marcas de puntería para calibración de escáner TLS.	157
Figura 163: Registro mediante TLS de una planta industrial.....	158
Figura 164: Aplicaciones de TLS en función del alcance del escáner. ....	159
Figura 165: Diferentes configuraciones de cámaras digitales y escáneres láser utilizadas por Mitsubishi. ....	161
Figura 166: IMC Dodeca 2360.....	162
Figura 167: Ephel Eysis. ....	162
Figura 168: Modelos Ladybug3 de 2 megapíxeles cada cámara y 15 FPS (izquierda) y Ladybug5 de 5 megapíxeles cada cámara y 10 FPS (derecha).....	162
Figura 169: Principio operativo de los láser escáner 2D montados en MMS. ....	162
Figura 170: Ventaja del LIDAR sobre la fotogrametría a la hora de tomar puntos del suelo cerca de objetos con volumen. LiDAR: un solo rayo (rojo). Fotogrametría: mínimo dos rayos (azul y rojo).....	168
Figura 171: Perfil del tendido eléctrico y el terreno con objetos. ....	169
Figura 172: Archivo con puntos en la parte superior erróneamente medidos, posiblemente debido a la presencia de un río (zona central sin puntos).....	179
Figura 173: Detalle de la figura anterior donde se han clasificado puntos pertenecientes al terreno desnudo (naranja), edificaciones (morado), vegetación (verde) y líneas eléctricas (azul). ....	179
Figura 174: Gráfico resumen del procesamiento de datos ALS.....	180
Figura 175: Gráfico con la procedencia de los datos de los diferentes sensores ALS. ....	181

Figura 176: Ejemplo de tres pasadas antes de ajustar. ....	181
Figura 177: Ejemplo con las tres pasadas ajustadas. ....	181
Figura 178: Pasadas independientes con puntos de ajuste. ....	182
Figura 179: Pasadas transformadas al sistema de referencia. ....	182
Figura 180: Errores producidos en el modelado de la zona de solape entre dos pasadas. .	183
Figura 181: Curvas de nivel generadas en una zona de solape entre pasadas ALS. ....	183
Figura 182: Posición correcta de la edificación. ....	184
Figura 183: Edificación ajustada a la izquierda. ....	184
Figura 184: Edificación ajusta a la derecha. ....	184
Figura 185: Puntos sobre una cubierta inclinada de un edificio. ....	184
Figura 186: Archivo procedente de ALS más líneas estructurales registradas mediante restitución fotogramétrica. ....	185
Figura 187: Vista de detalle de la figura anterior. A simple vista, es difícil distinguir qué puntos están en el interior del camino. ....	185
Figura 188: Fachada arquitectónica registrada mediante LiDAR. ....	186
Figura 189: Fachada arquitectónica registrada mediante cámara fotográfica. ....	186
Figura 190: Transformaciones a realizar con la nube de puntos ALS. ....	187
Figura 191: Modelo del geoide mundial EGM2008 de la NGA. ....	188
Figura 192: Husos UTM para España. ....	189
Figura 193: Gráfico con las tareas a realizar en el filtrado de datos ALS. ....	189
Figura 194: Modelo con triangulación generada con un punto aéreo. De color rojo, los triángulos generados con dicho punto. ....	190
Figura 195: Modelo con triangulación generada con un punto hundido. De color rojo, los triángulos generados con dicho punto. ....	190
Figura 196: Gráfico con los objetos a detectar en el proceso de clasificación de datos ALS. .....	191
Figura 197: Puntos mostrados de manera independiente. ....	193
Figura 198: Línea de puntos escaneada. ....	193
Figura 199: Puntos coloreados en función del objeto al que pertenecen. ....	193
Figura 200: Entidades generadas después de la clasificación de los puntos. ....	193
Figura 201: Nube de puntos LiDAR visualizada mediante la intensidad registrada por el sensor. ....	199
Figura 202: Nube de puntos LiDAR visualizada con el color RGB asignado con fotografía aérea. ....	201
Figura 203: Gráfico con las operaciones a realizar en el control de calidad de datos ALS.	201
Figura 204: Ejemplo de nube de puntos LiDAR mostrada con la clasificación de los puntos más la imagen cónica aérea como fondo. ....	202
Figura 205: Gráfico con las operaciones a realizar con el MDT y con el MDS. ....	203

Figura 206: Ejemplo de mapa de tintas hipsométricas calculado a partir de nube de puntos LiDAR.....	204
Figura 207: Modelo digital de terreno texturizado con la ortofoto más objetos con las edificaciones y arbolado de la zona.....	204
Figura 208: Nube original.....	209
Figura 209: Representación de la triangulación calculada.....	209
Figura 210: Representación de la triangulación suavizada. ....	209
Figura 211: Representación mediante NURBS ajustadas a trozos.....	209
Figura 212: Procedimiento de triangulación radial.....	215
Figura 213: Inserción incremental de un punto en una triangulación.....	216
Figura 214: Algoritmo de barrido. ....	217
Figura 215: División del espacio (2D) en <i>quadtrees</i> . ....	220
Figura 216: Gráfico con la relación entre cantidad de puntos y tiempo invertido para calcular la tetraedrización de Delaunay.....	230
Figura 217: Relación de un punto con su entorno: Desnivel y distancia a un vecino. ....	233
Figura 218: Puntos clasificados y límite generado con ellos. ....	235
Figura 219: Gráfico con la relación entre cantidad de puntos y tiempo invertido para clasificar en función de la geometría.....	236
Figura 220: Ejemplo del registro de un sensor ALS. ....	238
Figura 221: Imagen aérea de la zona registrada por el sensor. ....	238
Figura 222: Líneas de registro con los puntos clasificados como “suelo desnudo” (color verde) y edificación (color naranja). ....	239
Figura 223: Líneas de registro con los puntos clasificados como “suelo desnudo” (color verde), edificación (color naranja) y otros objetos (color rojo) entre los que se encontraría la vegetación o mobiliario urbano. ....	240
Figura 224: Vista oblicua de un ejemplo donde se aprecian los puntos sobre las líneas eléctricas, elevados sobre el resto de puntos. ....	245
Figura 225: Vista cenital del mismo ejemplo, con puntos sobre líneas eléctricas (color azul). ....	246
Figura 226: Puntos clasificados sobre árboles y edificios.....	246
Figura 227: Puntos sobre cubierta (rojo), sobre fachada (azul) y suelo (verde). ....	247
Figura 228: Ejemplo de zona edificada con puntos sobre fachadas (color azul) y punto sobre cubierta (color morado). ....	247
Figura 229: Mismo ejemplo triangulado, donde se pueden apreciar las cubiertas planas (horizontales e inclinadas) correspondientes a los edificios de la zona. ....	248
Figura 230: Zona registrada mediante TLS con las curvas de nivel calculadas. Las curvas consideradas procedentes de objetos se muestran en color verde y las procedentes del suelo están en color siena. ....	250



Figura 231: Puntos de zona anterior clasificados mediante el algoritmo en función de la morfología. De color verde se presentan los objetos detectados. ....	250
Figura 232 Vista cenital con las curvas de nivel del suelo desnudo del ejemplo anterior. ....	250
Figura 233: Gráfico con la relación entre cantidad de puntos y tiempo invertido para clasificar utilizando “Superficie mágica”. ....	254
Figura 234: Triangulación de puntos (color negro) más puntos ficticios (color rojo). En verde, el límite exterior. ....	255
Figura 235: Límites de los puntos clasificados como edificación. ....	256
Figura 236: Vista donde se pueden apreciar las diferentes alturas de los límites generados. ....	256
Figura 237: Relación entre un sistema de coordenadas externo, el sistema de coordenadas de la fotografía y las coordenadas de un punto registrado en ésta. ....	258
Figura 238: Composición aditiva. ....	262
Figura 239: Cubo RGB. ....	262
Figura 240: Representación HSL. ....	262
Figura 241: Representación HSV. ....	262
Figura 242: Representación HSL con croma. ....	263
Figura 243: Representación HSV con croma. ....	263
Figura 244: Ejemplo de las curvas de nivel calculadas mediante líneas límite. ....	266
Figura 245: Interpolación bilineal. ....	267
Figura 246: Rectificación a partir de MDT. ....	268
Figura 247: Rectificación a partir de MDS. ....	268
Figura 248: <i>True-orto</i> . ....	269
Figura 249: Zona de sombra en el registro LiDAR. ....	269
Figura 250: Modelo generado considerando los puntos de suelo y de edificación conjuntamente. ....	270
Figura 251: Leyenda de los diagramas de flujo. ....	271
Figura 252: Diagrama de flujo de triangulación rápida en 2D. ....	272
Figura 253: Diagrama de flujo de tetraedrización. ....	273
Figura 254: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos en función de la geometría. ....	274
Figura 255: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos en función del orden de registro. ....	275
Figura 256: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos en función de la intensidad. ....	276
Figura 257: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos en función de la geometría e información multiespectral. ....	277
Figura 258: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos en función de la geometría e intensidad. ....	278

Figura 259: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos elevados. ....	279
Figura 260: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos hundidos.....	280
Figura 261: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos aislados. ....	281
Figura 262: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos de fachadas. ....	282
Figura 263: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos de cubiertas.....	283
Figura 264: Diagrama de flujo para la clasificación según morfología.....	284
Figura 265: Diagrama de flujo para la clasificación mediante “Superficie mágica” .....	285
Figura 266: Diagrama de flujo para comprobar las edificaciones clasificadas. ....	286
Figura 267: Diagrama de flujo para comprobar la vegetación alta clasificada.....	286
Figura 268: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos LiDAR de forma asistida. ....	287
Figura 269: Diagrama de flujo para la clasificación de puntos LiDAR de forma no asistida. .....	288
Figura 270: Esquema con las pasadas y los fotogramas realizados. ....	299
Figura 271: Ejemplos representativos de la zona. A la izquierda, visualizado utilizando la intensidad registrada por el sensor. A la derecha, visualizado utilizando la clasificación realizada. En la imagen izquierda, se puede apreciar la diferente densidad de puntos en la zona central, provocada por el solape de dos pasadas. ....	300
Figura 272: Distribución de los puntos medidos con GPS (color rojo) sobre las pasadas (color negro) y la ortofoto de la zona.....	300
Figura 273: Nube de puntos LiDAR representada según la intensidad registrada por el sensor.....	304
Figura 274: Nube de puntos LiDAR representada utilizando una gama de tintas hipsométricas.....	304
Figura 275: Datos LiDAR clasificados. De color marrón claro los puntos clasificados como suelo, de color verde la vegetación y de color magenta las edificaciones. ....	305
Figura 276: Puntos LiDAR clasificados. De color azul, los puntos sobre fachadas. ....	306
Figura 277: Límites generados a partir de los datos LiDAR clasificados como edificación. .....	306
Figura 278: Límites de edificaciones generados con la imagen aérea de fondo. ....	307
Figura 279: Modelo digital con edificaciones proyectadas. ....	307
Figura 280: Modelo digital con edificaciones proyectadas y ortofotografía. ....	308
Figura 281: Imagen de satélite del proyecto de regadío en Kenia.....	309
Figura 282: Nube de puntos LiDAR clasificada del proyecto de regadío en Kenia. ....	309
Figura 283: Curvas de nivel obtenidas mediante restitución fotogramétrica del proyecto de regadío en Kenia. ....	310
Figura 284: Curvas de nivel obtenidas a partir de los datos LiDAR del proyecto de regadío en Kenia. ....	310
Figura 285: Imágenes de la toma de datos en campo.....	311

Figura 286: Imagen tomada con cámara réflex no métrica más los puntos de control medidos para el cálculo de la orientación de la imagen. ....	312
Figura 287: Nube de puntos LiDAR con la posición de los puntos de control. ....	312
Figura 288: Imagen orientada más los puntos LiDAR. ....	314
Figura 289: Nube de puntos LiDAR representada utilizando el valor de RGB añadido de la fotografía. ....	314
Figura 290: Ortofotografía de la Casa de la Villa. ....	315
Figura 291: Diversas imágenes donde se puede apreciar el petroglifo desde diversos puntos de vista y el estacionamiento realizado con el escáner láser y la estación topográfica para dar coordenadas a las dianas. ....	317
Figura 292: Imagen correspondiente al registro LiDAR visualizando la nube de puntos utilizando la intensidad reflejada por el petroglifo. ....	317
Figura 293: Modelo digital generado con la nube de puntos. ....	318
Figura 294: Imagen de detalle del modelo digital. ....	318
Figura 295: Modelo digital generado a partir de información restituída fotogramétricamente. ....	319
Figura 296: Modelo digital con ortofoto como tapiz. ....	320
Figura 297: Nube de puntos LiDAR mostrados utilizando la intensidad registrada por el sensor. ....	321
Figura 298: Nube de puntos LiDAR mostrados utilizando la clasificación calculada. ....	321
Figura 299: Nube de puntos LiDAR más curvas de nivel calculadas. ....	322
Figura 300: Nube de puntos LiDAR mostrados utilizando la color en función de la altitud. ....	322
Figura 301: Modelo de tetraedros calculados a partir de la nube de puntos. ....	323
Figura 302: Resultados gráficos para la zona 11. ....	326
Figura 303: Resultados gráficos para la zona 12. ....	326
Figura 304: Resultados gráficos para la zona 21. ....	327
Figura 305: Resultados gráficos para la zona 22. ....	327
Figura 306: Resultados gráficos para la zona 23. ....	328
Figura 307: Resultados gráficos para la zona 24. ....	328
Figura 308: Resultados gráficos para la zona 31. ....	329
Figura 309: Resultados gráficos para la zona 41. ....	329
Figura 310: Resultados gráficos para la zona 42. ....	330
Figura 311: Resultados gráficos para la zona 51. ....	331
Figura 312: Resultados gráficos para la zona 52. ....	331
Figura 313: Resultados gráficos para la zona 53. ....	331
Figura 314: Resultados gráficos para la zona 54. ....	332
Figura 315: Resultados gráficos para la zona 61. ....	332

Figura 316: Resultados gráficos para la zona 71. ....	333
Figura 317: Comparativa entre algoritmos en los errores cometidos al identificar puntos suelo. ....	335
Figura 318: Comparativa entre algoritmos en los errores cometidos al identificar puntos objeto. ....	336
Figura 319: Comparativa entre algoritmos en los errores cometidos al identificar puntos. .....	336
Figura 320: Comparativa entre algoritmos, ordenados de izquierda a derecha, de menor a mayor error total en la clasificación de puntos. ....	337
Figura 321: Gráfico con la velocidad de clasificación del algoritmo “Superficie mágica”. ....	342
Figura 322: División de los sensores activos basados en señales ópticas. ....	375
Figura 323: Gráfico comparativo de precisión/distancia máxima entre sensores ópticos activos de medición de distancia. ....	376
Figura 324: Registro mediante triangulación. ....	377
Figura 325: Principio de la medición láser mediante triangulación. ....	377
Figura 326: Triangulación utilizando línea. ....	378
Figura 327: Triangulación utilizando patrón. ....	378
Figura 328: Ejemplos de patrones basados en franjas binarias. ....	378
Figura 329: Esquema de un sensor de interferometría láser (Lerma & Biosca, 2008). ....	380
Figura 330: Algunas formas típicas de un pulso. ....	381
Figura 331: Diámetro del rayo sobre el terreno. ....	382
Figura 332: Longitudes de onda de algunos sensores LiDAR. ....	383
Figura 333: Nube de puntos LiDAR mostrada utilizando la intensidad. ....	384
Figura 334: Factor de corrección para la distancia máxima del láser, dependiendo de la reflexividad de destino. ....	385
Figura 335: Reflejo sobre superficie plana. El pulso recibido es similar al emitido. ....	386
Figura 336: Reflejo sobre superficie irregular. Se reflejan varios pulsos. ....	387
Figura 337: Haz incidiendo sobre superficies con diferente inclinación. ....	387
Figura 338: Haz incidiendo parcialmente sobre un objeto. ....	387
Figura 339: Pulso de respuesta de una superficie plana. ....	387
Figura 340: Pulso de respuesta de una superficie inclinada. ....	387
Figura 341: Pulso de respuesta de una superficie irregular. ....	387
Figura 342: Pulso de respuesta de una superficie irregular e inclinada. ....	387
Figura 343: Haces incidiendo con ángulo diferente sobre vegetación. ....	388
Figura 344: Reflexión del rayo sobre superficies acuáticas. ....	388
Figura 345: Diferentes ecos de respuesta. ....	388
Figura 346: Múltiples pulsos. ....	389

Figura 347: Diferentes tipos de respuesta en función de la superficie incidida por el rayo. ....	389
Figura 348: Tiempo entre dos pulsos consecutivos.....	391
Figura 349: Amplitud y tiempo de subida de un pulso. En realidad, la forma no es trapezoidal sino gaussiana, aunque así se muestre. ....	392
Figura 350: Principio de la medida de distancias utilizando diferencia de fase. ....	393
Figura 351: Diferentes longitudes de onda para medir una distancia mediante diferencia de fase. ....	393
Figura 352: Mecanismo del espejo oscilante.....	395
Figura 353: Patrón de puntos medidos en zigzag.....	395
Figura 354: Mecanismo del polígono rotante.....	395
Figura 355: Patrón de puntos medidos en líneas paralelas. ....	395
Figura 356: Mecanismo del espejo oscilante Palmer Scan.....	396
Figura 357: Patrón de puntos medidos con forma elíptica.....	396
Figura 358: Esquema de medición de los puntos con el mecanismo Palmer Scan.....	396
Figura 359: Mecanismo de interruptor de fibra.....	397
Figura 360: Patrón de puntos medidos en líneas paralelas. ....	397
Figura 361: Imágenes registradas con una cámara RIM. La imagen de la izquierda tiene color según distancia. La imagen de la derecha son los valores de gris de la intensidad. ..	398
Figura 362: Panasonic D-IMager.....	399
Figura 363: Mesa SwissRanger 4000.....	399
Figura 364: Microsoft Kinect.....	399
Figura 365: PMD CamCube. ....	399
Figura 366: Ejemplo de un perfil con árboles registrado mediante full-waveform.....	400
Figura 367: Señal <i>full-waveform</i> recibida mediante una señal de huella estrecha (izquierda) y de huella ancha (derecha).....	401
Figura 368: Frecuencia de recogida de información por un sensor de pulso simple. ....	402
Figura 369: Frecuencia de puntos duplicada por un sensor de múltiples pulsos.....	402
Figura 370: Comparación entre la relación de altura de vuelo y frecuencia PRF del sensor Leica ALS70-HP funcionando en modo SPiA y en modo MPiA (Leica, 2013). ....	403
Figura 371: Señal de advertencia de láser. ....	404
Figura 372: Leica ALS70. ....	408
Figura 373: Optech ALTM Pegasus.....	409
Figura 374: Riegl LMS-Q780. ....	410
Figura 375: Riegl VQ-580.....	410
Figura 376: IGI LiteMapper 6800. ....	411
Figura 377: IGI LiteMapper en Schweizer 333. ....	411

Figura 378: IGI LiteMapper en Eurocopter AS-350. ....	411
Figura 379: IGI LiteMapper en Bell 206.....	411
Figura 380: Antiguos TopoSys Falcon II y III.....	412
Figura 381: Trimble Harrier 68i. ....	412
Figura 382: Sensor LiDAR montado por Fugro FLI-MAP.....	412
Figura 383: Helicópteros de Fugro equipados con FLI-MAP.....	413
Figura 384: Optech CZMIL.....	414
Figura 385: Riegl VQ-820-G.....	415
Figura 386: AHAB HawkEye II.....	415
Figura 387: Riegl VZ-6000.....	417
Figura 388: Riegl VZ-400 con cámara Nikon. ....	417
Figura 389: Riegl VQ-450. ....	417
Figura 390: Leica ScanStation P20.....	418
Figura 391: Optech ILRIS. ....	418
Figura 392: Topcon GLS-1500. ....	418
Figura 393: Trimble CX 3D Scanner.....	419
Figura 394: SICK LMS511.....	419
Figura 395: Velodyne HDL-64E. ....	419
Figura 396: Montaje del Velodyne HDL-64E.....	420
Figura 397: Leica HDS 7000.....	420
Figura 398: FARO Laser Scanner Focus 3D. ....	420
Figura 399: Trimble FX 3D Scanner. ....	421
Figura 400: Trimble TX5. ....	421
Figura 401: Z+F Imager 5010C.....	421
Figura 402: NextEngine 3D Scanner HD.....	422
Figura 403: Nub3D SIDIOPro. ....	422
Figura 404: Breuckmann stereoSCAN 3D.....	422
Figura 405: Mantis Vision F5. ....	423
Figura 406: Mantis Vision F5 SR.....	423
Figura 407: Konica Minolta Vivid 9i. ....	423
Figura 408: Escáner móvil de mano ZEB1.....	424
Figura 409: Vehículo equipado con StreetMapper y foto de detalle donde se distingue el sensor de Riegl. ....	424
Figura 410: Sistema Topcon IP-S2 montado sobre un automóvil y vista de detalle. ....	425
Figura 411: Configuración del MMS de Mitsubishi.....	426



Figura 412: Trimble MX8 montado sobre automóvil. ....	427
Figura 413: Trimble TIMMS para interiores. ....	427
Figura 414: Vista frontal del Trimble MX8. ....	427
Figura 415: Optech LYNX Mobile Mapper sobre vehículo.....	428
Figura 416: Optech LYNX Mobile Mapper sin carcasa.....	428
Figura 417: Detalle de la configuración del Leica Pegasus y montaje sobre automóvil. ....	428
Figura 418: Riegl VMX-450. ....	429
Figura 419: Siteco Road-Scanner3. ....	429
Figura 420: MDL Dynascan HD100.....	429
Figura 421: IGI AEROcontrol.....	430
Figura 422: Applanix POS AV.....	431
Figura 423: Leica IPAS 20. ....	431
Figura 424: Honeywell HG1700. ....	431
Figura 425: IXBLUE AIRINS. ....	432
Figura 426: Visualización de datos LiDAR mediante puntos.....	433
Figura 427: Visualización de datos LiDAR como como MDT.....	433
Figura 428: Perfil generado sobre la nube de puntos. ....	434
Figura 429: MARS de Merrick. ....	436
Figura 430: TerraScan sobre MicroStation.....	437
Figura 431: Fledermaus. ....	438
Figura 432: Quick Terrain Modeler.....	438
Figura 433: MDTopX de Digi21.....	439
Figura 434: Inpho SCOP++.....	440
Figura 435: Trimble RealWorks. ....	441
Figura 436: 3DReshaper. ....	442
Figura 437: Leica Cyclone. ....	442
Figura 438: Innovmetric PolyWorks.....	443
Figura 439: Coordenadas geodésicas de un punto. ....	446
Figura 440: Geoide y elipsoide.....	449
Figura 441: El geoide.....	450
Figura 442: El geoide.....	450
Figura 443: El geoide y los elipsoides. ....	450
Figura 444: La fuerza centrífuga.....	450
Figura 445: Las superficies de nivel. ....	451
Figura 446: Detalle del modelo del geoide EGM2008 para España peninsular y Baleares (Instituto Geográfico Nacional, 2009). ....	452

Figura 447: Transformación de siete parámetros de Helmert. ....	453
Figura 448: Puntos comunes exteriores a la zona de trabajo. ....	454
Figura 449: Modelo de altura generado por cuatro puntos. ....	455
Figura 450: Proyección cartográfica. ....	456
Figura 451: Desarrollo cilíndrico directo. ....	456
Figura 452: Desarrollo transversal conforme de Gauss. ....	457
Figura 453: Cuadro de diálogo Buscar puntos elevados. ....	459
Figura 454: Cuadro de diálogo Buscar puntos aislados. ....	460
Figura 455: Cuadro de diálogo Buscar puntos aéreos. ....	461
Figura 456: Cuadro de diálogo Buscar puntos hundidos. ....	462
Figura 457: Cuadro de diálogo Buscar puntos por diferencia de intensidad. ....	463
Figura 458: Cuadro de diálogo Buscar puntos según línea de vuelo. ....	464
Figura 459: Cuadro de diálogo Buscar puntos según geometría más RGB. ....	466
Figura 460: Cuadro de diálogo Buscar puntos según geometría más intensidad. ....	467
Figura 461: Cuadro de diálogo Buscar puntos en Superficies Planas. ....	468
Figura 462: Cuadro de diálogo Buscar puntos en Paredes. ....	469
Figura 463: Cuadro de diálogo Superficie mágica. ....	470
Figura 464: Cuadro de diálogo Orientación midiendo puntos. ....	472
Figura 465: Equipo exacto pero de baja precisión. ....	475
Figura 466: Equipo preciso pero de baja exactitud. ....	478
Figura 467: Curvas de reflexividad según longitud de onda para rayos que inciden perpendicularmente sobre espejos metálicos de aluminio (Al), plata (Ag), y oro (Au). Fuente: wikipedia.es. ....	479

## F.3. Relación de tablas

Tabla 1: Precisiones GNSS según metodología de observación. ....	55
Tabla 2: Tiempos de observación en el método estático según longitud de la línea base. ..	62
Tabla 3: Comparación de precisiones entre las técnicas GPS cinemáticas. ....	64
Tabla 4: Modelado de los errores GNSS. ....	65
Tabla 5: Características técnicas de cámaras digitales de medio formato. ....	84
Tabla 6: Clasificación de los UAV. ....	90
Tabla 7: Tabla resumen de los satélites ópticos de gran resolución. ....	96
Tabla 8: Características de los sistemas SAR terrestres. ....	102
Tabla 9: Bandas de los sistemas radar. ....	104
Tabla 10: Transmisión de errores en una medida ALS. Todas las unidades lineales están expresadas en cm. ....	150
Tabla 11: Caracterización de las técnicas de registro tridimensional. ....	174
Tabla 12: Errores de ajuste entre un objeto y la nube de puntos LiDAR por similitud de cotas de puntos vecinos en una cubierta plana. ....	184
Tabla 13: Resultados obtenidos en la primera aproximación del algoritmo de triangulación 2D. ....	223
Tabla 14: Resultados obtenidos en la segunda aproximación del algoritmo de triangulación 2D. ....	224
Tabla 15: Resultados obtenidos en la tercera aproximación del algoritmo de triangulación 2D. ....	224
Tabla 16: Tetraedrización de un archivo mostrado con diferentes resoluciones. ....	228
Tabla 17: Resultados obtenidos del algoritmo de triangulación 3D. ....	230
Tabla 18: Resultados obtenidos del algoritmo de clasificación en función de la geometría. ....	236
Tabla 19: Resultados obtenidos del algoritmo de clasificación “Superficie mágica”. ....	253
Tabla 20: Ejemplo de imágenes utilizando diversas variables en valores de gris. De izquierda a derecha y de arriba abajo, RGB, tono, índice croma, saturación, intensidad y valor. ....	264
Tabla 21: Comparaciones entre puntos GPS y LiDAR. Los valores están dados en metros. ....	301
Tabla 22: Proyección de los puntos obtenidos por correlación sobre los MDT obtenidos por LiDAR. ....	302
Tabla 23: Proyección de los puntos obtenidos por LiDAR sobre los MDT obtenidos por correlación. ....	302
Tabla 24: Resultados obtenidos para la zona 1. ....	325
Tabla 25: Resultados obtenidos para la zona 2. ....	327
Tabla 26: Resultados obtenidos para la zona 3. ....	328
Tabla 27: Resultados obtenidos para la zona 4. ....	329

Tabla 28: Resultados obtenidos para la zona 5. ....	330
Tabla 29: Resultados obtenidos para la zona 6. ....	332
Tabla 30: Resultados obtenidos para la zona 7. ....	333
Tabla 31: Resultados obtenidos en todas las zonas. ....	334
Tabla 32: Resultados obtenidos en el algoritmo de triangulación. ....	339
Tabla 33: Resultados obtenidos en el algoritmo de tetraedrización. ....	340
Tabla 34: Resultados obtenidos en el algoritmo de clasificación en función de la geometría. .....	341
Tabla 35: Comparación entre sistemas ópticos de medición de distancia activos. ....	376
Tabla 36: Proceso de registro mediante un escáner basado en triangulación de franjas binarias (NUB3D, 2013). ....	379
Tabla 37: Reflexividad para un láser Riegl con longitud de onda de 900 nm (Riegl, 2013). .....	385
Tabla 38: Tabla resumen de los sensores LiDAR topográficos aerotransportados. ....	407
Tabla 39: Tabla resumen de los sensores LiDAR terrestres. ....	416
Tabla 40: Tabla resumen de los sensores LiDAR terrestres 2D. ....	416
Tabla 41: Nube de puntos LiDAR visualizada con diferentes características. De izquierda a derecha, intensidad, clasificación, tintas hipsométricas y color registrado con cámara óptica. .....	435